

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA CAPA DE
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE
POLIPROPILENO DE UM SISTEMA DE LAJE MISTA SOB
AÇÃO DE CARGAS CONCENTRADAS

Dissertação submetida à Universidade
Federal de Santa Catarina exigida
pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil - PPGEC, como
parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Civil.

DANIEL VENANCIO VIEIRA

Florianópolis, maio de 2010.

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA CAPA DE
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE
POLIPROPILENO DE UM SISTEMA DE LAJE MISTA SOB
AÇÃO DE CARGAS CONCENTRADAS

DANIEL VENANCIO VIEIRA

Dissertação submetida à Universidade
Federal de Santa Catarina exigida
pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil - PPGEC, como
parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Civil.

Prof.^a. Dr.^a. Janaíde Cavalcante Rocha – Coordenadora do PPGEC

Prof. Roberto Caldas A. Pinto, Ph.D. – Orientador / Moderador

Prof. Dr. Narbal Ataliba Marcelino – Co-Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof.^a Henriette Lebre La Rovere, Ph.D. – ECV/UFSC

Prof. Ivo José Padaratz, Ph.D. – ECV/UFSC

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. – ECV/UFSC

Prof. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, Ph.D. – UnB

*A Deus em primeiro lugar, pela vida,
saúde e amigos. A minha família, por todo
carinho, apoio e compreensão.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, meus pais Moacir Vieira e Maria Goretti Venancio Vieira e meu irmão Lucas Venancio Vieira, pelas palavras de incentivo, pela compreensão, carinho e apoio em todos os momentos.

Aos amigos e colegas do mestrado, Mateus Mazzuco, Fabio Santana, Carlos Menegazzo, Adolfo Nallar, Francisco Dornelles, Marlon Beninca Cristian Bruns, Fernando, Lorenzo e Wilson.

Ao Professor Roberto Caldas A. Pinto, meu orientador, por sua atenção, dedicação em todos os momentos, pela confiança depositada, pelos incentivos e pela amizade.

À Professora Henriette Lebre La Rovere por todo incentivo, dedicação e apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus colegas de projeto Paulo Junges e Isabel Canalli pelos momentos de descontração, apoio dentro e fora do ambiente de pesquisa e pela amizade.

Aos amigos e colegas do GRUPEX (Grupo de Experimentação de Estruturas), do GIEM (Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira), do GPEND (Grupo de Pesquisa em Ensaios Não-destrutivos) e GTec (Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes a Base de Cimento Portland) pela disponibilidade, convivência e apoio.

A todos os professores, funcionários e técnicos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos, Sílvia e Glauco, Sarita e Mário, Erizete e Edson, Carlos Martendal, que me acolheram como filho e amigo, dando incentivo, apoio e principalmente amor e carinho.

Às empresas CSE *Composites*, SIKA, Termotécnica, NeoNatex e Polimix pelo fornecimento do material para a confecção dos protótipos.

À FAPESC (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina) pelo apoio financeiro e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

Esta dissertação visa dar continuidade a um projeto de pesquisa desenvolvido anteriormente na UFSC e denominado: “*Laje Mista de Concreto e Perfis Pultrudados de PRFV – Aplicação em Tabuleiros de Passarelas*”, que tinha como objetivo o desenvolvimento de uma laje mista composta de uma capa de concreto apoiada sobre perfis pultrudados de PRFV, com preenchimento de blocos de EPS entre perfis e adição de fibras curtas de polipropileno à mistura de concreto para controle da fissuração. A aplicação principal da laje proposta foi em passarelas expostas a ambientes de atmosfera agressiva. No projeto anterior, a laje mista apresentou bom desempenho no comportamento estrutural quando submetida à flexão, tanto para cargas de curta como de longa duração. Entretanto, nos ensaios de flexão a quarto pontos do estudo desenvolvido anteriormente, a carga foi aplicada uniformemente ao longo da seção transversal, logo não foi avaliado o efeito de carga concentrada sobre a laje mista. Conhecer o comportamento estrutural da laje mista sob ação de cargas concentradas é importante para o projeto da capa de concreto visto que o carregamento concentrado em uma pequena região da laje pode gerar tensões de tração na capa de concreto não considerado no dimensionamento inicial. Sendo assim, há a necessidade de verificação do comportamento estrutural da capa de concreto da laje mista sob a ação de carregamento concentrado aplicado de forma estática ou dinâmica (impacto), sendo este o foco desta dissertação de mestrado. Para alcançar esta meta foi realizada inicialmente a análise numérica da laje mista e de modelos reduzidos representando o sistema de laje mista. A partir dos resultados numéricos foi desenvolvido um programa experimental para estudo de placas de concreto com adição de fibra sob ação de dois tipos de carregamento concentrado: carregamento estático e carga de impacto com energia da ordem de 20 Nm por impacto. Nos ensaios é avaliado o efeito de diferentes espessuras: 4, 5 e 6 cm; e diferentes tipos e teores de fibras de polipropileno incorporadas às misturas. Para o ensaio de carga concentrada os resultados demonstraram um aumento no valor de carga última da placa com o aumento da espessura, porém, a incorporação de fibras ao concreto auxiliou somente em uma maior ductilidade das placas. A carga última média observada nos ensaios foi de aproximadamente 10 kN e a ruptura típica ocorreu com o aparecimento de uma fissura ligeiramente inclinada na direção transversal da placa. A

resistência ao impacto das misturas de concreto utilizadas foi avaliada por meio do método proposto pelos pesquisadores SCHMIDT et al (2001), utilizando pequenas lajes quadradas de dimensões 400 x 400 x 20 mm totalmente apoiadas em seus bordos. Os modos de ruptura observados variaram entre ruptura à flexão e à punção. Enquanto as placas das misturas sem fibras e com adição de 0,1% de microfibras sofreram ruptura por flexão, sendo caracterizada pela ocorrência de fissuras perpendiculares entre si e separação da placa em 4 partes distintas. Placas produzidas com fibras do tipo Durus com teores de 1% e 2% sofreram ruptura por punção, caracterizada pela ocorrência de fissuras perpendiculares entre si e esmagamento da região logo abaixo do local de aplicação da carga de impacto.

Palavras-chave: laje mista, carga concentrada, fibras de polipropileno.

ABSTRACT

This dissertation continues a research Project developed at UFSC entitled “Composite Slab System of a Fiber-Reinforced Concrete Top over Pultruded GFRP I-Beams – Application in Pedestrian Bridges. The main objective is the development of a composite slab made of reinforced-concrete top over GFRP I-beams. The composite slab system includes Styrofoam blocks, placed between GFRP beams, and polypropylene fibers added to the concrete mixture for cracking control. The main application of such bridges is for footbridges exposed to an aggressive environment. In an early stage of this research project, the composite slab system showed a good structural behavior in bending both for static short loads and sustained loads. However, in the flexure experiments, the load was applied uniformly throughout the width of the specimens. Thus, the effects of concentrated loads were not verified. It is very important to know the behavior of the composite slab to concentrated loads in order to specify the thickness of the concrete top since these loads may lead to localized tensile stresses in the concrete top, which should be part of the slab design. Therefore, this dissertation focuses on the behavior of the composite slab system to concentrated static loads and dynamic loads. Initially, a numerical analysis of the composite slab was performed by means of a finite element analysis. This analysis permitted to find some reduced models subjected to similar stresses as the composite slab. This led to the development of an experimental program to study the influence of small fiber-reinforced concrete plates subjected static and dynamic loading. The dynamic loading was applied as an impact load with energy of 20 Nm per impact. Three levels of plate thickness (4, 5 and 6 cm), and the addition of different types of polypropylene fibers at different volumes were analyzed. In the case of static loading, the results indicated that the thicker the plate, the greater the observed failure load. However, the addition of fibers only helped to achieve a more ductile behavior. The observed failure load for all plates was approximately 10 kN, while the typical modes of failure was the occurrence of an inclined cracking in the transversal direction of the plate. The impact resistance of the concrete mixtures was evaluated by the SCHMIDT et al (2001) method. Small square plates of 400 x 400 x 20 mm, totally supported in their borders, were used. The observed failure modes ranged from flexural to punching modes. Concrete mixtures without fibers and with an addition

of 0.1% of microfibers showed a flexural mode of failure, characterized by perpendicular cracks, and plate separation in 4 parts. Plates produced with Durus fibers at 1% and 2% showed a punching mode of failure, characterized by perpendicular cracks, and crushing of the concrete region just below the application of the impact load.

Keywords: mixed slab; concentrated load; polypropylene fibers.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS.....	17
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Justificativa.....	22
1.2 Objetivos	23
1.3 Estrutura do trabalho	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Sistema de laje mista com materiais compostos	25
2.2 Concreto reforçado com fibras: aspectos estruturais.....	29
2.2.1 <i>Desenvolvimento do CRF</i>	<i>31</i>
2.2.2 <i>Desenvolvimento do CRF</i>	<i>31</i>
2.2.3 <i>Concepção da matriz e avaliação do CRF</i>	<i>33</i>
2.3 Efeito de carga concentrada em placas de concreto	33
2.3.1 <i>Punção em elementos de concreto.....</i>	<i>33</i>
2.3.2 <i>Impacto em concreto reforçado com fibras.....</i>	<i>38</i>
2.4 Projeto de pesquisa da laje mista concreto/PRFV	40
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	47
3.1 Estudo preliminar	47
3.1.1 <i>Ensaio preliminar de carga concentrada</i>	<i>48</i>
3.2 Definição de um modelo numérico e experimental.....	50
3.3 Sistema de laje mista com perfis I de abas curtas	56
3.3.1 <i>Influencias de modificações na seção transversal.....</i>	<i>57</i>
3.4 Ensaios experimentais com fibras de polipropileno	60
4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL	63
4.1 Produção das placas de concreto	63
4.2 Ensaios de carga concentrada	64
4.2.1 <i>Carga concentrada estática.....</i>	<i>64</i>

4.2.2 Carregamento de impacto	66
5 RESULTADOS: APRESENTAÇÃO E COMENTÁRIOS	69
5.1 Resultados de carga concentrada estática	69
5.1.1 Análise estatística dos resultados de carga de ruptura	79
5.2 Resultados de carga concentrada de impacto	81
5.3 Aplicação dos resultados no sistema de laje mista.....	86
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6.1 Introdução.....	87
6.2 Considerações sobre os experimentos realizados.....	87
6.2.1 Carregamento concentrado com carga estática.....	87
6.2.2 Carregamento concentrado com carga de impacto.....	89
6.3 Sugestões e recomendações para trabalhos futuros.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	97
Anexo A: Estudo de traço para fck de 30 MPa – curva de dosagem	97
Anexo B: Ruptura das placas com carregamento estático.....	98
Anexo C: Ruptura das placas com carga de impacto.....	110

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Ponte Chemung Country Bridge (Mossallam, 2002).</i>	20
<i>Figura 1.2 Passarela Antioch Composite Pedestrian (JOHANSEN, 2003).</i>	20
<i>Figura 1.3 Passarela construída no campus da UCSD.</i>	21
<i>Figura 1.4 Laje Mista de Concreto/PRFV (SANTOS NETO, 2006).</i>	21
<i>Figura 2.1 Tipos de fibra, teores e tecnologias de mistura (ZOLLO, 1997).</i>	30
<i>Figura 2.2 Mecanismos de absorção de energia (ZOLLO, 1997).</i>	32
<i>Figura 2.3 “Mushroom System” – Sistema cogumelo (Souza, 1998).</i>	34
<i>Figura 2.4 Efeito da punção em lajes lisas (FERREIRA, 2005).</i>	35
<i>Figura 2.5 Carga x volume de fibras (ZAMBRABA VARGAS, 1997).</i>	37
<i>Figura 2.6 Esquema de ensaio proposto pelo comitê ACI 544 (1989).</i>	39
<i>Figura 2.7 Esquema do ensaio proposto por SCHMIDT et al (2001).</i>	39
<i>Figura 2.8 Laje mista de concreto/ PRFV (SANTOS NETO, 2006).</i>	40
<i>Figura 2.9 Seção (mm) dos Perfis I de abas largas, (SANTOS NETO, 2006).</i>	40
<i>Figura 2.10 Processo de pultrusão (www.exelcomposites.com).</i>	41
<i>Figura 2.11 Seção transversal da laje mista (SANTOS NETO, 2006).</i>	42
<i>Figura 3.1 Modelo experimental preliminar.</i>	47
<i>Figura 3.2 Instrumentação do ensaio preliminar.</i>	48
<i>Figura 3.3 Abertura de fissura na placa de concreto.</i>	49
<i>Figura 3.4 Malha de elementos finitos da laje mista.</i>	50
<i>Figura 3.5 Deslocamento relativo entre capa e perfil (Δd).</i>	51
<i>Figura 3.6 Carregamento concentrado sobre o centro do vão da laje.</i>	52
<i>Figura 3.7 Carregamento concentrado sobre os apoios da laje.</i>	52
<i>Figura 3.8 Sistema de laje Mista com um e três vãos entre perfis.</i>	52
<i>Figura 3.9 Deslocamentos relativos no apoio das seções de lajes.</i>	53
<i>Figura 3.10 Contra flecha e momentos nulos na capa de concreto.</i>	53
<i>Figura 3.11 Região de contra flecha e momento nulo.</i>	54
<i>Figura 3.12 Modelos de placas propostos.</i>	54
<i>Figura 3.13 Modelo experimental adotado.</i>	55
<i>Figura 3.14 Seção do perfil I de abas curtas (mm).</i>	56
<i>Figura 3.15 Sentido dos eixos locais (CANALLI, 2010).</i>	56
<i>Figura 3.16 Seção da laje com perfis I de abas curtas (mm).</i>	57
<i>Figura 3.17 Espessura da capa x altura do perfil.</i>	58
<i>Figura 3.18 Espessura da capa x módulo de elasticidade do perfil.</i>	59
<i>Figura 3.19 Aspecto das fibras NeoFibra MF.</i>	61
<i>Figura 3.20 Aspecto das fibras do tipo Durus.</i>	61
<i>Figura 4.1 Modelo de experimental adotado.</i>	64
<i>Figura 4.2 Esquema do ensaio de carga concentrada estática.</i>	65

<i>Figura 4.3 Posicionamento do aparato de carga e LVDT's.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.4 Detalhes no posicionamento dos LVDT's.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.5 Ruptura característica das placas.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.6 Esquema do ensaio de impacto (m).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.1 Dispersão dos resultados de ruptura das placas.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.2 Diagrama de caixas da carga de ruptura das placas.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.3 Ruptura das placas de concreto (superfície inferior).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.4 Comportamento carga x deslocamento placas REF4.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.5 Comportamento carga x deslocamento placas REF5.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.6 Comportamento carga x deslocamento placas REF6.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.7 Comportamento de placas intermediarias REF.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.8 Comportamento carga x deslocamento da placas MF4.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.9 Comportamento carga x deslocamento da placas MF5.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.10 Comportamento carga x deslocamento da placas MF6.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.11 Comportamento de placas intermediarias MF.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.12 Comportamento carga x deslocamento das placas D1%4.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.13 Comportamento carga x deslocamento das placas D1%5.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.14 Comportamento carga x deslocamento das placas D1%6.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.15 Comportamento carga x deslocamento das placas D2%5.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.16 Comportamento carga x deslocamento das placas D2%5.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.17 Comportamento carga x deslocamento das placas D2%5.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.18 Comportamento de placas intermediarias D1%.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.19 Comportamento de placas intermediarias D2%.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.20 Carga x deslocamento de placas intermediarias de 6 cm.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.21 Carga x deslocamento de placas intermediarias de 6 cm.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.22 Carga x deslocamento de placas intermediarias de 6 cm.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.23 Dispersão dos resultados de ruptura por carga de impacto.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.24 Placas REF e MF: superfície superior (a) e inferior(b).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.25 Placas D1% e D2%: superfície superior (a) e inferior (b).....</i>	<i>83</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 Propriedades Elásticas do Perfil, Santos Neto (2006).</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 2.2 Propriedades dos Perfis I de abas largas, Santos Neto (2006).</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 2.3 Esforços e coeficientes, La Rovere e Santos Neto (2007).</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 3.1 Dimensões do modelo experimental preliminar.</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 3.2 Propriedades adotadas no modelo de elementos finitos.</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 3.3 Deslocamentos relativos (Δd) nos modelos propostos.</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 3.4 Propriedades dos laminados que compõe as paredes do perfil.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 3.5 Estimativa analítica das propriedades do perfil.</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 3.6 Teores de fibras de polipropileno das misturas.</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 3.7 Propriedade das fibras de polipropileno.</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 4.1 Misturas de concreto utilizadas.</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 4.2 Resistência à compressão média e módulo de elasticidade.</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5.1 Carga de ruptura das placas ensaiadas (kN).</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 5.2 Valores da relação Carga de ruptura/$f_{c1/3}$ (kN/MPa^{1/3}).</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 5.3 Resultados da análise ANOVA de dois fatores.</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 5.4 Ordenação de médias para mistura REF.</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 5.5 Ordenação de médias para mistura MF.</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 5.6 Ordenação de médias para mistura D1%.</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 5.7 Ordenação de médias para mistura D2%.</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 5.8 Número de golpes necessários para a ruptura das placas.</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 5.9 Energia de impacto na ruptura das placas ensaiadas (Nm).</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 5.10 Energia de impacto na ruptura das placas (Nm/$f_{c1/3}$).</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 5.11 Resultados da análise ANOVA de dois fatores.</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 5.12 Ordenação de médias para espessura 4 cm.</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 5.13 Ordenação de médias para espessura 5 cm.</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 5.14 Ordenação de médias para espessura 6 cm.</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 5.15 Ordenação de médias para mistura REF.</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 5.16 Ordenação de médias para mistura MF.</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 5.17 Ordenação de médias para mistura D1%.</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 5.18 Ordenação de médias para mistura D2%.</i>	<i>85</i>

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente empregado na construção civil. Seus constituintes básicos são cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo. Como material estrutural possui diversas vantagens, como por exemplo, é um material facilmente moldável, apresenta boa resistência a maioria dos tipos de solicitações, possui baixo custo de mão de obra, seus processos construtivos são bem difundidos e é durável. Porém possui algumas restrições, como por exemplo, baixa resistência a tração, peso próprio elevado, apresenta retração, fluência e no caso do concreto armado as armaduras são suscetíveis à corrosão.

As estruturas, em geral, encontram-se ao longo de sua vida útil sujeitas a diversos agentes agressivos que por ações químicas ou físicas podem gerar o enfraquecimento mecânico dos seus elementos constituintes. Hoje em dia muitas estruturas estão em processo de deterioração, particularmente os tabuleiros de pontes e viadutos em concreto armado, em consequência da corrosão das barras de aço reduzindo-se, assim, a vida útil destas construções.

A situação citada acima evidencia a necessidade da pesquisa de novos materiais e técnicas que levem a uma maior durabilidade das estruturas com menor custo de manutenção e conservação.

A evolução tecnológica que ocorre no mundo inteiro nas últimas décadas tem acelerado o desenvolvimento de novos materiais e processos que podem ser utilizados em diversas áreas. Na engenharia civil destacam-se os materiais compostos, que são uma combinação de dois ou mais materiais para a formação de um novo material com propriedades diferentes, com a finalidade de se obter um melhor comportamento da estrutura (PIERIN e LA ROVERE, 2006).

Como exemplo da aplicação de materiais compostos avançados em estruturas pode-se citar a utilização de tabuleiros em materiais compostos para substituir os tabuleiros em processo avançado de deterioração. O Departamento de Transporte dos Estados Unidos (DOT) de Nova York optou em utilizar um tabuleiro de polímero reforçado com fibras (PRF) para substituir o antigo tabuleiro da *Chemung Country Bridge*. Na Figura 1.1 pode ser vista a instalação do tabuleiro, o sistema estrutural da ponte é constituído por uma treliça em estrutura metálica construída em 1940 (MOSALLAM, 2002).



Figura 1.1 Ponte Chemung Country Bridge (Mossallam, 2002).

A passarela apresentada na Figura 1.2 foi construída no Clube de Golfe do município de Antioch em Illinois, EUA, possui 11,43 m de comprimento e 2,54 m de largura, sendo construída com perfis pultrudados em fibra de vidro e resina viniléster. Este projeto é parte de um programa de pesquisa, cujo um dos objetivos era monitoramento da estrutura para verificação do comportamento a longa duração do PRF, exposto a condições ambientais naturais.



Figura 1.2 Passarela Antioch Composite Pedestrian (JOHANSEN, 2003).

Na Universidade da Califórnia em San Diego (UCSD) foi construída uma passarela em materiais compostos. Constituída de cabos estais em aço e tabuleiro misto em painéis de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV) coberto por uma capa de concreto, a Figura 1.3 mostra a estrutura da passarela. As vigas e o pilar são de seção tubular em fibra de carbono, preenchidos com concreto.



Figura 1.3 Passarela construída no campus da UCSd.

No Brasil a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) está desenvolvendo um sistema de laje mista, constituída por uma capa de concreto e perfis pultrudados de PRFV. A Figura 1.4 apresenta esquematicamente a laje proposta. Esta laje foi resultante de um projeto de pesquisa desenvolvido na UFSC financiado pela FAPESC denominado “*Laje Mista de Concreto e Perfis Pultrudados de PRFV – Aplicação em Tabuleiros de Passarelas*”.

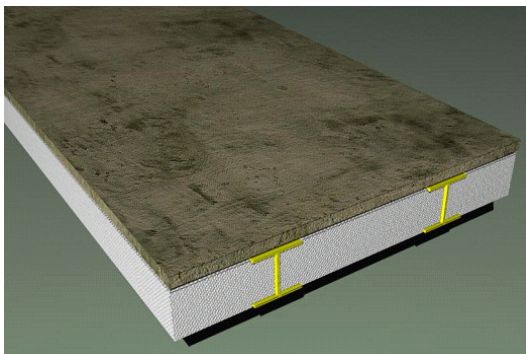


Figura 1.4 Laje Mista de Concreto/PRFV (SANTOS NETO, 2006).

Em praticamente todas as situações apresentadas o princípio fundamental utilizado foi retirar o aço e substituí-lo por outro material menos suscetível a ação das intempéries em ambientes agressivos, no caso perfis de polímero reforçado com fibras (PRF). Nestas estruturas os perfis de PRF são dimensionados e posicionados no sistema de maneira

que trabalhem tracionados enquanto a capa de concreto é projetada para suportar esforços de compressão.

Em geral, os sistemas de estrutura mista concreto/perfis de PRF funcionam adequadamente, porém, a utilização de uma capa de concreto delgada e sem reforço de aço pode tornar o sistema mais frágil à ação de cargas concentradas quando estas ocorrem somente sobre a capa de concreto, podendo ocasionar ruptura da capa.

Esses carregamentos concentrados em lajes e passarelas podem ocorrer por diferentes motivos como: tráfego de veículos de transporte ou manutenção sobre a estrutura em que o posicionamentos dos pneus seja entre eixos de perfis, ou seja, diretamente sobre a capa de concreto; ou ainda por queda de objetos a uma altura que possibilite gerar energia de impacto considerável em relação a resistência da capa de concreto.

1.1 Justificativa

Esta dissertação visa dar continuidade a um projeto de pesquisa desenvolvido anteriormente, financiado pela FAPESC, e denominado: *“Laje Mista de Concreto e Perfis Pultrudados de PRFV – Aplicação em Tabuleiros de Passarelas”* que tinha como objetivo o desenvolvimento de uma laje mista composta de uma capa de concreto apoiada sobre perfis pultrudados de PRFV, com preenchimento de blocos de EPS entre perfis e adição de fibras curtas de polipropileno à mistura de concreto para controle da fissuração. A aplicação principal da laje proposta foi em passarelas expostas a ambientes de atmosfera agressiva. No projeto anterior, a laje mista apresentou bom desempenho no comportamento estrutural quando submetida à flexão, tanto para cargas de curta como de longa duração.

Entretanto, nos ensaios de flexão a quatro pontos do estudo desenvolvido anteriormente, a carga foi aplicada uniformemente ao longo da seção transversal, logo não foi avaliado o efeito de carga concentrada sobre a laje mista. Conhecer o comportamento estrutural da laje mista sob ação de cargas concentradas é importante para o projeto da capa de concreto visto que o carregamento concentrado em uma pequena região da laje pode gerar tensões de tração na capa de concreto não considerado no dimensionamento inicial.

Sendo assim, há a necessidade de verificação do comportamento estrutural da capa de concreto da laje mista sob a ação de carregamento

concentrado aplicado de forma estática ou dinâmica (impacto), sendo este então o foco desta pesquisa.

Existem ainda algumas verificações necessárias para completar o estudo da laje mista que são abordadas em outras duas dissertações de mestrado no PPGEc da UFSC e tem como tema a análise de vibrações induzidas por solicitações de atividades humanas e o estudo da aderência entre concreto e perfis de PRFV.

1.2 Objetivos

Esta dissertação visa estudar o comportamento estrutural de placas de concreto reforçadas com fibras de polipropileno sob a ação de cargas concentradas, tanto estáticas (carga monotônica e crescente) como dinâmicas (carga de impacto), visando a aplicação em capas de concreto de lajes mistas de concreto e perfis de PRFV. Investiga-se o efeito da adição de dois tipos de fibra de polipropileno ao concreto, variando-se também seus teores.

Os objetivos específicos deste trabalho são listados a seguir:

- Analisar numericamente por meio do Método dos Elementos finitos (MEF) o comportamento do sistema de laje mista, quando submetido a carregamento concentrado;
- Caracterizar experimentalmente a forma de ruptura da capa de concreto reforçado com fibra através da utilização de protótipos reduzidos que representem o sistema de laje mista em estudo quando submetidos à carga concentrada estática ou de impacto;
- Investigar a influência da adição de fibras na capa de concreto, quanto à resistência a ruptura por carga concentrada estática ou de impacto, variando-se o teor fibras incorporado a mistura;
- Avaliar a influência de diferentes espessuras da capa de concreto, quanto à resistência a ruptura por carga concentrada estática ou de impacto.

1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho possui sete capítulos, considerando a introdução e as referências bibliográficas, acrescida de três anexos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre sistemas de laje mista com materiais compostos, incluindo aspectos estruturais de concreto reforçado com fibras. São apresentados também de forma resumida alguns estudos sobre os efeitos do carregamento concentrado em placas de concreto. Além disso, são apresentados dados referentes à primeira fase do projeto de pesquisa da laje mista.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia de pesquisa utilizada para definição de um modelo experimental para ensaios de carregamento concentrado. São descritas ainda alterações que ocorreram nas dimensões dos elementos da laje mista em estudo e suas implicações neste trabalho. Além disso, são especificados os tipos e teores de fibras de polipropileno adotados para a pesquisa.

O Capítulo 4 mostra os procedimentos para realização da investigação experimental com o modelo definido anteriormente. São expostos detalhes da realização dos ensaios de carga concentrada estática e de impacto.

No Capítulo 5 são apresentados os principais resultados e análises obtidas a partir dos ensaios de carga concentrada.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas algumas considerações finais, bem como sugestões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de laje mista com materiais compostos

O desenvolvimento de novas estruturas esteve sempre ligado, em primeiro lugar, a projetos designados a infra-estrutura (pontes, viadutos e passarelas) e posteriormente a construção de residências e edifícios.

Com o advento das estruturas mistas, surgiram pontes caracterizadas pela junção de vigas metálicas e um tabuleiro em concreto armado. Este sistema começou a ser utilizado a partir de 1930 e principalmente após a 2ª guerra mundial. As vigas de aço podem ser em perfil laminado, soldado ou caixão. Conforme Pinho e Bellei (2007), neste tipo de ponte o aço trabalha junto com o concreto, cada qual na sua melhor função. O comportamento como estrutura mista é garantida pela solidarização dos dois materiais. Assim, é necessária a utilização de elementos de ligação, conectores de cisalhamento, soldados sobre a mesa superior das vigas.

A utilização de elementos mistos e, por consequência, de sistemas mistos aço-concreto, segundo Nardin et al (2003), ampliou consideravelmente o conjunto de soluções em concreto armado e em aço. De maneira geral, a crescente utilização de estruturas mistas foi atribuída a diversos fatores, entre os quais a necessidade cada vez maior de grandes áreas livres por pavimento, que resulta em grandes vãos para as vigas, acréscimo de força vertical nos pilares e um maior espaçamento entre eles. Neste tipo de situação, os elementos mistos possibilitam a redução das dimensões da seção transversal, ampliando as áreas livres e reduzindo as forças verticais.

Outro aspecto importante é a necessidade de atender aos prazos de entrega da edificação, fator que requer o emprego de sistemas estruturais para os quais seja possível obter rapidez e facilidade de execução, sem grandes acréscimos no custo final da edificação. Também é importante a localização da edificação que, por vezes, resulta em espaço reduzido para montagem de canteiro de obras e limitações impostas pela vizinhança (NARDIN et al, 2003).

Estruturas produzidas pela interação entre aço e concreto apresentam, na maioria dos casos, problemas relacionados principalmente com deterioração do aço, tanto aquele que compõe as vigas e pilares quanto ao aço embebido pelo concreto de lajes em estruturas mistas.

A corrosão é uma das causas mais importantes da deterioração de pontes metálicas. Entre os vários fatores contribuintes para instaurar e acelerar o processo de corrosão em pontes metálicas pode-se citar o envelhecimento das pontes, o aumento da carga de tráfego, ataque ambiental e, algumas vezes, a inadequação de projetos, detalhamento e construção da estrutura (BRINCK et al., 2005).

A corrosão é um processo que transforma os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam. Devido ao grande número de pontes metálicas construídas em todos os continentes, a degradação por corrosão destas tem gerado gastos elevados com manutenção e ou reposição das pontes, tornando a corrosão de pontes metálicas um problema mundial (GENTIL, 2003).

Os tabuleiros de pontes e passarelas em concreto armado também estão susceptíveis à degradação. Dentre as manifestações patológicas, a corrosão das armaduras é uma das mais frequentes. O processo de corrosão das armaduras implica em crescente perda de seção das barras e formação de produtos expansivos. Este processo é evolutivo tendendo a se agravar com o tempo (POLITO, 2006).

Conforme Tavares et al (2006), observa-se que nos últimos anos tem crescido o número de edificações cujas estruturas de concreto armado têm apresentado manifestações patológicas, principalmente relacionadas com a corrosão das armaduras. Esta tendência de crescimento é consequência do envelhecimento precoce das estruturas devido principalmente à má execução, uso incorreto de materiais, projeto inadequado e/ou planejamento.

Frente à dificuldade de compatibilizar os materiais disponíveis com o meio ambiente, ou seja, garantir um período maior de vida útil para a estrutura, surge a necessidade de se projetar utilizando materiais com maior durabilidade e assim o interesse em pesquisas sobre estruturas mistas utilizando compósitos avançados.

Materiais compostos avançados foram inicialmente utilizados no reforço de materiais cimentícios por meio da incorporação de fibras curtas de vidro na década de 30. Após a II Guerra Mundial, os Estados Unidos começaram a produzir fibras de vidro e resinas poliésteres utilizados para a fabricação de barcos e antenas de radar. A indústria automobilística, no ano de 1950, pela primeira vez produziu veículos com materiais compostos. Devido à desejável leveza, resistência à corrosão entre outras características dos compostos, foi dada ênfase à investigação e aprimoramento científico do processo de fabricação do

material. Esse esforço conduziu ao desenvolvimento de duas novas técnicas de produção conhecidas como bobinamento e pultrusão, que ajudou a tecnologia dos compósitos a avançar sobre novos mercados. Houve uma grande demanda pela indústria de recreação para a produção de varas de pesca, raquetes de tênis, equipamentos de esqui e golfe. A indústria aeroespacial começou a utilizar os compósitos em ambientes pressurizados e componentes não-estruturais das aeronaves. A marinha do governo norte americano começou a aplicar os compósitos em grande escala nos navios e em elementos de submarinos (BENJAMIN, 1997).

Apesar da ampla utilização destes materiais na indústria aeroespacial, naval e militar, a sua aplicação na engenharia civil tem sido limitada principalmente em função de razões econômicas (SANTOS NETO, 2006). As principais características dos materiais compostos avançados tais como forma livre, elevada resistência específica (razão resistência/peso) e o alto grau de inércia química em relação ao meio ambiente, não superam o alto custo destes na comparação direta a materiais estruturais convencionais como aço, concreto ou alvenaria.

Contudo, nos últimos anos essa situação tem-se modificado de forma significativa. Os pesquisadores Seible e Karbhari (1996) apresentam como principais responsáveis por esta nova fase dos compostos os seguintes itens:

- Avanços nos processos de fabricação dos PRF, como a pultrusão por exemplo, e os processos automatizados ou semi-automatizados de fabricação de grandes componentes têm reduzido bastante os custos;
- A demanda reduzida de materiais compostos reforçados com fibras de carbono ou aramida na indústria militar, expansão do uso de fibras no mercado competitivo da indústria de artigos esportivos e as perspectivas de uso no setor civil levaram a uma redução nos custos de fabricação;
- Projetos de sistemas estruturais constituídos com estes novos materiais juntamente com materiais estruturais convencionais, ao invés da substituição individual dos componentes ou projetos completos em materiais compostos avançados, demonstraram que os PRF podem ser tecnicamente eficientes, e ao mesmo tempo, economicamente competitivos.

Os compostos de PRF, conforme Hong e Hastak (2007) tornaram-se populares nos últimos anos, tanto na construção de novas instalações quanto na renovação de estruturas existentes, isto devido às suas características técnicas, vantagens e benefícios, já citados. Em particular, tabuleiros de pontes constituídas por estruturas mistas de concreto e FRP têm recebido maior atenção nos últimos anos devido às suas inerentes vantagens em relação aos tradicionais pavimentos em aço e concreto armado. Os engenheiros civis começam a ganhar confiança e experiência na aplicação de materiais compostos avançados.

Durante os anos de 1990 até o novo milênio, a utilização de materiais compostos poliméricos ou avançados tem feito grandes avanços no campo de construções de engenharia civil, especialmente na área de pontes. Ao longo da história, a engenharia de pontes tem sido grande aliada ao desenvolvimento de materiais estruturais. No passado, quando um novo material era descoberto, assim como aconteceu com o ferro forjado ou o aço, protótipos de pontes eram construídos com frequência para demonstrar a capacidade dos materiais. No entanto, os materiais compostos não apresentaram de imediato suas vantagens, como fizeram as pontes construídas em aço frente àquelas feitas em madeira ou pedra. Como consequência, os polímeros reforçados com fibras só foram vistos como um material que pudesse substituir o aço na engenharia de pontes na última década, quando todas as implicações devido à corrosão do aço em pontes modernas e o peso específico do material começaram a ser considerados (HOLLAWAY, 2003).

Para reforçar a aplicação dos materiais poliméricos reforçados com fibras na renovação de obras de infra-estrutura, segundo Hong e Hastak (2007), uma série de investigações envolvendo estudos econômicos serão necessárias para maximizar os benefícios e minimizar suas desvantagens. Algumas dessas investigações poderiam incluir o desenvolvimento de modelos de desempenho para painéis de pontes convencionais e em FRP, o desenvolvimento de um modelo de custos para ciclos de avaliação dos modelos de painéis, o desenvolvimento de sistemas modulares inovadores para reduzir os elevados custos iniciais, e ainda análise da produtividade e do custo de instalação destes painéis.

Os materiais compostos de PRF utilizados em pavimentos de pontes são tipicamente feitos com resinas de vinil-éster ou poliéster reforçado com fibras de vidro. Eles são projetados e produzidos em uma fábrica com grande controle sobre o produto resultante, e, em seguida, são montados e instalados onde a ponte será construída. A redução de peso e as propriedades modulares dos elementos compostos que

constituem o tabuleiro auxiliam e melhoram a transportabilidade, facilitando a instalação, e reduzindo a necessidade de equipamentos pesados. Estas características dos materiais compostos resultam em diversas vantagens sobre os materiais convencionais, oferecendo grandes incentivos para contratantes como uma ferramenta rápida durante a construção (HONG e HASTAK, 2007).

Apesar de suas vantagens e versatilidades os compostos em PRF, como já foi colocado anteriormente, não têm sido utilizados de forma generalizada na engenharia civil, devido ao alto custo inicial, concepção restrita, pouca experiência e falta de estudos a longo prazo que disponibilizem dados confiáveis sobre seu desempenho.

No entanto, o uso de estruturas mistas em concreto e PRF pode se tornar uma alternativa viável quando observadas as vantagens da combinação entre estes materiais. O concreto auxilia na resistência à compressão, estabilidade do sistema e tende a reduzir o custo total da estrutura, enquanto o PRF atua na resistência a tração.

No caso de lajes pré-moldadas, o uso de um sistema misto de concreto e perfis de PRFV pode proporcionar redução no peso próprio da estrutura além dos perfis ainda servirem como forma para o concreto (SANTOS NETO e LA ROVERE, 2007).

2.2 Concreto reforçado com fibras: aspectos estruturais

O desempenho de um concreto reforçado com fibras (CRF) pode variar em função de uma série de propriedades, tais como: o tipo de material constituinte, a geometria, a distribuição, a orientação e ainda a concentração das fibras. Apesar da quantidade de variáveis que influenciam no comportamento mecânico do material (CRF), diversas formulações teóricas já foram criadas para representar de forma adequada casos específicos (ZOLLO, 1997).

Dessa forma, apenas a terminologia genérica “CRF” utilizada para estes materiais seria insuficiente para uma análise de engenharia. Como consequência, terminologias baseadas nos tipos de fibras têm sido amplamente utilizadas para descrever a variedade de materiais.

Segundo a terminologia adotada pelo “*American Concrete Institute*” (ACI), *Committee 544*, existem quatro categorias de CRF baseadas no tipo de fibra: fibras de aço “SFRC” (“*steel fiber reinforced concrete*”), fibras de vidro “GFRC” (“*glass fiber reinforced concrete*”),

fibras sintéticas “SNFRC” (“*synthetic fiber reinforced concrete*”) e fibras naturais “NFRC” (“*natural fiber reinforced concrete*”).

A busca por materiais de construção com propriedades como resistência, ductilidade, tenacidade e durabilidade reforçadas elevou o interesse por materiais como o concreto reforçado com fibra (CRF). O elemento formador da matriz que envolve as fibras nesta discussão é o concreto de cimento Portland comum. No entanto, outros tipos de cimento com características específicas poderiam ser utilizados (CACHIM et al, 2002).

A proporção de fibras dentro de uma determinada unidade de volume de CRF pode variar em relação ao volume total de concreto produzido. É importante realizar uma avaliação com base na concentração de fibras, por ser este um fator que pode afetar significativamente o desempenho do material durante a mistura, o lançamento e o endurecimento do material. Na Figura 2.1 pode ser visto um resumo dos principais tipos de fibras, teores e tecnologias de mistura (ZOLLO, 1997).

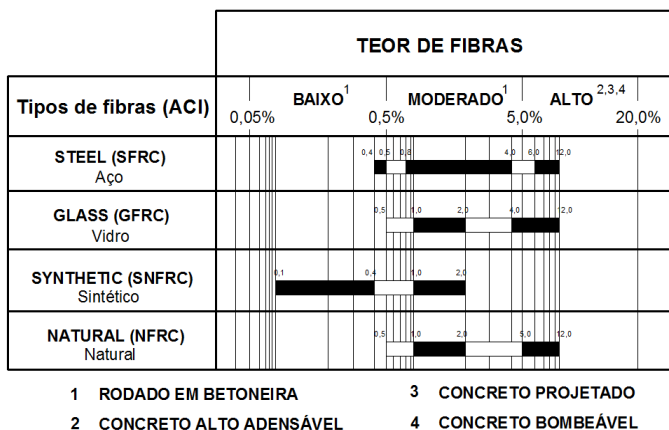


Figura 2.1 Tipos de fibra, teores e tecnologias de mistura (ZOLLO, 1997).

O pesquisador Zollo (1997) indica que a concentração afeta a escolha da tecnologia de produção do CRF e ainda que concentrações baixas de fibras possibilitam a utilização de técnicas usuais de mistura sem muitas restrições, porém, elevadas concentrações exigem equipamentos e técnicas mais refinadas.

2.2.1 Desenvolvimento do CRF

O desenvolvimento do CRF começou há aproximadamente três décadas atrás, baseado em um conceito de mecânica da fratura onde uma matriz constituída por concreto de cimento Portland era reforçada por filamentos contínuos estreitamente espaçados. A partir dos modelos de comportamento mecânico criados foram verificadas possibilidades de melhorias na resistência dos compostos reforçados com fibras e uma tendência de redução com o aumento do espaçamento entre os filamentos (ZOLLO, 1997).

Em experimentos iniciais eram utilizadas fibras de aço e posteriormente fibras de polipropileno, obtidas a partir de diversas fontes, como, resíduo da indústria de pneus e da indústria têxtil. Diversos experimentos foram produzidos, mas havia inicialmente dificuldades de controle sobre a geometria das fibras. As primeiras fibras testadas eram relativamente grossas (0,15 a 0,25 mm de diâmetro), dificultando a aplicação de processos de mistura tradicionais. A distribuição não uniforme das fibras na matriz impossibilitava a aplicação das teorias de mecânica da fratura para prever o comportamento do composto (ZOLLO, 1997).

A incapacidade inicial de produzir fibras, de forma economicamente viável, para aplicação do CRF desviou o interesse dos pesquisadores em desenvolver a técnica. Desde a década de 80, fibras de materiais e geometrias diferentes têm sido introduzidas no mercado. A evolução das fibras foi acompanhada por um significativo crescimento das técnicas de produção do CRF (ZOLLO, 1997).

Diversas pesquisas (RAMAKRISHNAN, 1996; CACHIM et al, 2002 e HADI, 2007) sobre concreto com fibras incorporadas apontam o aumento da ductilidade como a melhoria mais importante alcançada pela adição das fibras.

2.2.2 Desenvolvimento do CRF

Embora o espaçamento entre as fibras no CRF seja à base do conceito de desenvolvimento do CRF, uma avaliação do espaçamento de forma rigorosa seria inviável ou ainda enganosa. Portanto o termo espaçamento entre as fibras, em sua forma literal, não é aplicável, mas

visto de forma mais ampla é associado com a necessidade de impedir ou amenizar a propagação de fissuras (ZOLLO, 1997).

O mecanismo que possibilita a resistência à fissuração no CRF comporta-se de maneira semelhante ao agregado envolvido pela pasta de cimento no concreto comum. As fibras reforçam as propriedades elásticas do material; sua eficiência está diretamente ligada ao seu vínculo com a matriz e ao potencial de absorção de energia da fibra, podendo variar em função do teor de fibras, da superfície específica e da orientação destas no interior da matriz (ZOLLO, 1997).

A quantidade de fibras por unidade de volume do material que constitui a matriz, chamado de teor de fibras, é relacionada à probabilidade de que as fissuras encontrem fibras durante seu desenvolvimento.

A superfície específica das fibras está relacionada à quantidade de energia que é absorvida nos encontros entre fissuras e fibras. Desta forma, matrizes frágeis podem ser melhoradas ou ainda reforçadas (ZOLLO, 1997).

O esquema apresentado na Figura 2.2 demonstra o mecanismo de absorção de energia ou controle a fissuração fornecida pela introdução das fibras e ainda as fases do processo de formação das micro-fissuras. Estes mecanismos não dependem unicamente do espaçamento entre as fibras, no entanto, a utilização de um grande teor de fibras pode apresentar resultados significativos (ZOLLO, 1997).

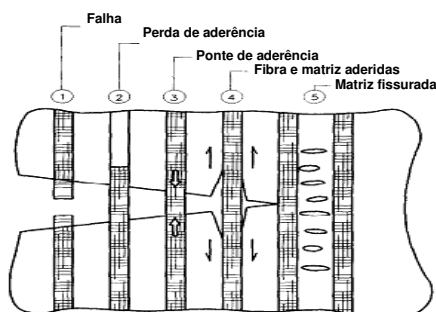


Figura 2.2 Mecanismos de absorção de energia (ZOLLO, 1997).

2.2.3 Concepção da matriz e avaliação do CRF

Avaliações a respeito da produção e maturidade do CRF devem ser feitas para a melhor adequação dos processos de mistura e cura. Deve ser dada atenção também à sequência de mistura dos elementos para garantir que as fibras utilizadas sejam distribuídas adequadamente na mistura e assim afetem as propriedades do CRF de forma positiva, melhorando a tenacidade da matriz do composto. Em algumas situações específicas, mediante a utilização de fibras mais grosseiras (fibras de maior rigidez que não tenham sido refinadas), podem exigir algum tipo de ajustamento da mistura para minimizar este efeito (ZOLLO, 1997).

Alguns métodos têm sido aplicados para avaliação do concreto reforçado com fibra (CRF), por exemplo, o ensaio de resistência a tração na flexão. É amplamente reconhecido que apenas o critério baseado na aplicação de força de compressão não é suficiente para a caracterização do CRF, e que é necessário considerar a comportamento pós-pico da curva carga x deformação na tração e os ganhos de tenacidade devido ao acréscimo das fibras (GIACCIO et al, 2008).

2.3 Efeito de carga concentrada em placas de concreto

Uma das premissas básicas do cálculo estrutural é que toda estrutura deve suportar a carga para qual foi projetada da forma mais segura possível utilizando o mínimo de material. No caso de estruturas submetidas a carregamentos concentrados, maior atenção deve ser dada à região onde ocorre este tipo de carga, sendo necessária muitas vezes a aplicação de reforço localizado para garantir o correto funcionamento do sistema estrutural.

As cargas concentradas podem ocorrer devido ao tráfego de veículos, ou por meio de impacto, quando da queda de objetos sobre a capa de concreto. Nestes casos, a estrutura pode sofrer efeitos como o puncionamento e ou a ruptura frágil.

2.3.1 Punção em elementos de concreto

Grande parte dos estudos realizados sobre o efeito da punção em lajes foi desenvolvido para lajes lisas de concreto armado. Conhecer o

comportamento de tais estruturas, quando submetidas a esforços que possam gerar punção, pode ser útil para a compreensão do efeito de cargas concentradas aplicadas sobre placas de concreto sem e com adição de fibras.

No início do século XX surgiram nos EUA as lajes apoiadas diretamente em pilares que logo vieram a ser patenteadas. Uma das patentes mais antigas da qual se tem registros segundo Souza (1998), foi requerida por C.A.P. Turner e denominada “*Mushroom system*” (sistema de laje cogumelo). A Figura 2.3 detalhes de armaduras utilizadas no sistema de laje cogumelo patenteado por C.A.P. Turner.

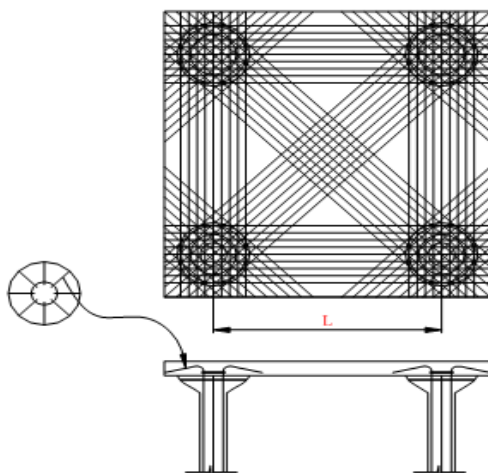


Figura 2.3 “Mushroom System” – Sistema cogumelo (Souza, 1998).

As patentes expiraram e as lajes cogumelo tornaram-se domínio público. Dessa forma o sistema passou a ter livre utilização, porém, em virtude de diversos problemas ocorridos com seu emprego no passado, tais como falta de mão de obra especializada e recursos para cálculo de esforços e deslocamentos, inicialmente não foi possível competir com os métodos tradicionais (FERREIRA, 2005).

Os problemas acontecidos no passado referem-se ao caso de acidentes fatais como, por exemplo, o desabamento do “*Prest-o-lite Building*”, em Indianápolis, Indiana, em dezembro de 1911, que causou a morte de nove pessoas e deixou outras vinte gravemente feridas (CASTELO BRANCO, 1989).

2.3.1.1 Conceitos básicos

Segundo a NBR 6118:2003, item 14.7.8, lajes-cogumelo são lajes apoiadas diretamente nos pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são aquelas apoiadas nos pilares sem capitéis.

As lajes são classificadas como: estruturas planas bidimensionais, nas quais a espessura é muito menor que as outras duas dimensões e ocorrem predominantemente ações transversais (normais ao plano médio).

Por ser um sistema no qual a laje se apóia diretamente nos pilares em uma região muito pequena, as lajes lisas apresentam na ligação laje/pilar uma alta concentração de tensões que na maioria das vezes faz com que o dimensionamento deva ser analisado de maneira mais criteriosa.

A redistribuição de momentos fletores garante uma boa reserva na capacidade à flexão nas lajes. Em decorrência desse motivo, sua capacidade de resistência, geralmente, é ditada pelo cisalhamento (punção) e não pela flexão, levando, assim, a uma ruptura por punção na ligação laje-pilar (FERREIRA, 2005).

Este tipo de ruptura nas lajes lisas ou cogumelo ocorre em forma de um deslocamento vertical formando uma superfície crítica, com inclinação aproximada de 30° em relação ao seu plano, como no exemplo apresentado na Figura 2.4. Sendo que na maioria dos casos acontece sem a ocorrência de escoamento da armadura de flexão, ou seja, é uma ruptura frágil (FERREIRA, 2005).

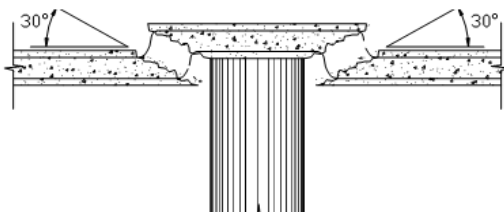


Figura 2.4 Efeito da punção em lajes lisas (FERREIRA, 2005).

2.3.1.2 Alguns ensaios experimentais realizados

Um dos precursores do estudo da punção em lajes foi o pesquisador Talbot (1913), que ensaiou 197 lajes, sem armadura de

combate ao cisalhamento, observando que 20 dessas lajes atingiram a ruína por punção.

A primeira tentativa de quantificar a influência da resistência à flexão na resistência à força cortante foi feita por Hognestad (1953). Elstner e Hognestad (1956) fizeram a primeira proposta para o cálculo da contribuição da armadura de punção na resistência da ligação e Moe (1961) foi um dos primeiros a analisar os casos assimétricos caracterizados por pilares de borda, de cantos e internos com carregamentos assimétricos (MELGES, 2001).

De acordo com alguns pesquisadores (CORDOVIL, 1997; TRAUTWEIN, 2006 e FERREIRA, 2005) a resistência à punção está diretamente relacionada com: resistência do concreto; a altura útil da laje; taxa de armadura de flexão; relação momento fletor/força cortante; velocidade de carregamento; aberturas nas lajes e armaduras de cisalhamento.

A utilização de armaduras de cisalhamento em diversas pesquisas (ANDERSON, 1963 e HALLGREN, 1996) apresentou um aumento considerável da carga última de ruptura das lajes, sendo observado um acréscimo de resistência com valores variando de 22% a 69%.

Alguns estudos (ANDERSON, 1963; HALLGREN, 1996 e BROMS, 2000) comparando lajes com armadura de cisalhamento e lajes semelhantes sem armadura de cisalhamento mostram que o aumento da ductilidade da laje é uma das principais vantagens do uso de armaduras de cisalhamento.

2.3.1.3 Ensaios experimentais de punção em CRF

Swamy & Ali (1982) apud Holanda (2002) examinaram o efeito da adição de fibras de aço na resistência à punção de ligações laje-pilar. Eles ensaiaram dezenove modelos de laje em escala real, simplesmente apoiados nos quatro bordos e carregados no centro por meio do tramo superior de um pilar. As principais variáveis estudadas foram: volume (0 a 1,37%) de fibras, quantidade e localização da armadura de flexão e combinação das fibras com armadura de cisalhamento.

Comparando resultados de concreto sem fibras e resultados de concreto com fibras de aço, eles observaram que as fibras promoveram diminuição dos deslocamentos em todas as etapas de carregamento (1% de fibras diminuiu em 30% os deslocamentos de serviço), aumentaram a carga última das ligações (1% de fibras aumentou 40% a força última), e

aumentaram as deformações que se mantiveram até a ruína. As fibras foram muito efetivas controlando a fissuração mesmo depois de atingida a carga última, aumentando a resistência residual da ligação, devido ao efeito de membrana após a ruptura.

Harajli et al. (1995) realizaram ensaios em doze modelos de ligação laje-pilar interno em escala reduzida para investigar a incorporação de fibras na resistência à punção de lajes cogumelo. Eram modelos simplesmente apoiados nos quatro bordos e carregados por meio de um pilar moldado monoliticamente no centro da laje. As principais variáveis do estudo foram: tipo de fibras (aço e polipropileno) e volume de fibras (0 a 2%).

Os autores mostraram que ao adicionar volumes de 1% e 2% de fibras de aço ao concreto foram observados acréscimos na resistência à punção das lajes entre 22% e 36%. Ao adicionar um volume de 1% de fibras de polipropileno o acréscimo observado na resistência a punção foi de apenas 15% na resistência, porém, houve um expressivo ganho de ductilidade na ruptura por punção.

Zambrana Vargas (1997) ensaiou doze modelos de ligação em escala reduzida. As principais variáveis foram: volume de fibras de aço, armadura tipo pino e resistência do concreto de (30 e 85 MPa).

O autor verificou nos ensaios que o número total de fissuras aumentou com a adição de fibras e que alguns casos, previstos para romperem por punção, tiveram seu modo de ruína alterado para punção-flexão. As fibras aumentaram a resistência das lajes à punção, sendo este aumento mais efetivo quando utilizadas armaduras transversais de combate à punção (Figura 2.5).

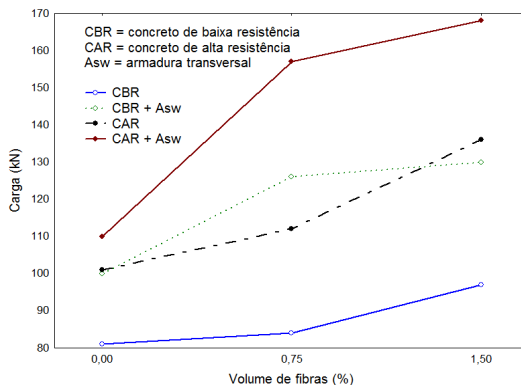


Figura 2.5 Carga x volume de fibras (ZAMBRABA VARGAS, 1997).

Os pesquisadores Hanai e Holanda (2008) analisaram a influência da incorporação de fibras de aço ao concreto na resistência à punção em lajes cogumelo e ao cisalhamento em vigas de concreto armado. A capacidade resistente última e a ductilidade das lajes e vigas análogas mostraram as mesmas tendências. Conforme o volume de fibras de aço variou entre 0% e 2%, houve acréscimo nos valores de resistência à punção e expressivo ganho de ductilidade.

2.3.2 Impacto em concreto reforçado com fibras

A adição de fibras em concreto afeta diversas características da mistura tanto no estado fresco, como no estado endurecido. O uso das mesmas possibilita, segundo Kern (1999) apud Bernardi (2003), a melhoria de várias propriedades mecânicas das matrizes frágeis, potencializando um aumento da resistência à flexão, à tração e ainda ao impacto com conseqüente aumento da tenacidade.

A tenacidade é a propriedade do material relacionada à quantidade de energia que este pode absorver antes de fraturar, ou seja, a energia de impacto necessária para levar o material à ruptura.

Os ganhos na absorção de energia ao impacto, proporcionados ao concreto reforçado com fibras, são aplicados no dimensionamento de placas para pavimentação, telhas pré-fabricadas, bem como elementos arquitetônicos de fachadas de edifícios. Estes elementos, quando submetidos a cargas de impacto, não devem apresentar fissuração instável que leve o material à ruptura frágil.

Diversas pesquisas (MANOLIS, 1997; SUKONTASUKKUL e MINDNESS, 2003; PINTO, 2005) mostram que a adição de fibras de polipropileno aumenta, consideravelmente, a resistência ao impacto de misturas de argamassa.

A resistência ao impacto de misturas de concreto reforçadas com fibras é geralmente avaliada por meio de corpos-de-prova cilíndricos, como proposto pelo comitê ACI 544 (1989). Este método se baseia na queda livre de uma massa de 4,5 kg a uma altura de 45 cm no centro geométrico de um corpo-de-prova cilíndrico de 150 mm de diâmetro e 60 mm de altura inteiramente apoiado em uma base rígida. O número total de golpes necessários para ocasionar a completa ruptura do corpo-de-prova é relacionado com a resistência ao impacto da mistura.

A Figura 2.6 apresenta um esquema do ensaio de corpos de prova cilíndricos proposto pelo comitê ACI 544 (1989).

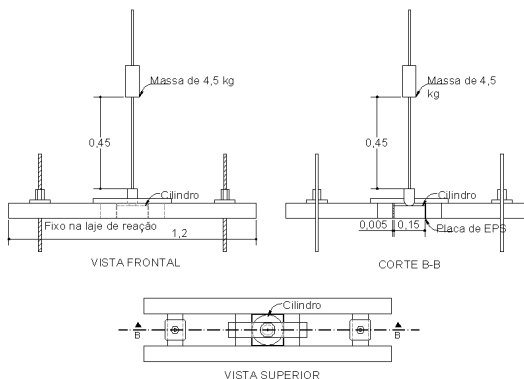


Figura 2.6 Esquema de ensaio proposto pelo comitê ACI 544 (1989).

Alternativamente, SCHMIDT et al (2001) apresentaram uma variação do ensaio anterior para avaliação da resistência ao impacto de argamassas, mantendo a massa a queda livre, porém utilizando pequenas lajes quadradas de 400 x 400 x 20 mm totalmente apoiadas em seus bordos, como mostra a Figura 2.7.

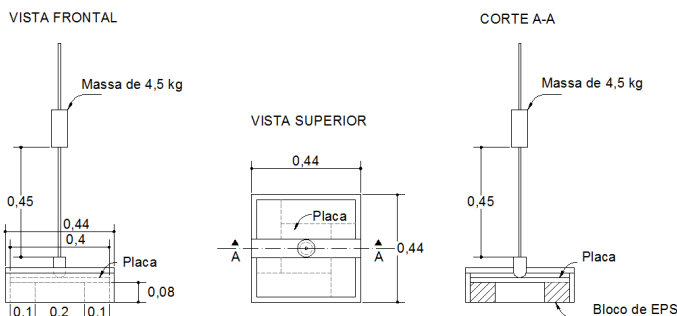


Figura 2.7 Esquema do ensaio proposto por SCHMIDT et al (2001).

Neste ensaio, a resistência ao impacto das placas é relacionada com o número de golpes necessário para que ocorra a ruptura total da placa, quando submetida a impactos consecutivos de uma massa de 4,5 kg caindo a uma altura de 45 cm no centro geométrico da placa (energia da ordem de 20 Nm por impacto). A placa é simplesmente apoiada ao longo de 10 cm, por todo seu perímetro, em uma camada de EPS (Poliestireno expandido) de 8 cm de espessura, ficando desta forma uma região quadrada de 20 x 20 cm de placa sem suporte.

2.4 Projeto de pesquisa da laje mista concreto/PRFV

O sistema estrutural de laje mista desenvolvido no projeto de pesquisa da UFSC e denominado “*Laje Mista de Concreto e Perfis Pultrudados de PRFV – Aplicação em Tabuleiros de Passarelas*” é constituído por uma capa de concreto disposta sobre vigas de perfis I pultrudados em fibra de vidro, com enchimento em blocos de EPS. Neste sistema o conjunto de perfis e blocos funcionam como fôrma para o concreto fresco, não sendo necessário o uso de escoramentos, devendo assim a fôrma suportar também as cargas construtivas. Após a cura do concreto, os dois materiais: concreto e perfis de PRFV combinam-se estruturalmente funcionando como uma laje de concreto.

Santos Neto (2006) realizou o dimensionamento do sistema de laje mista proposto (Figura 2.8) e ainda alguns estudos numéricos e experimentais para avaliação do comportamento estrutural da laje sob carregamento estático.

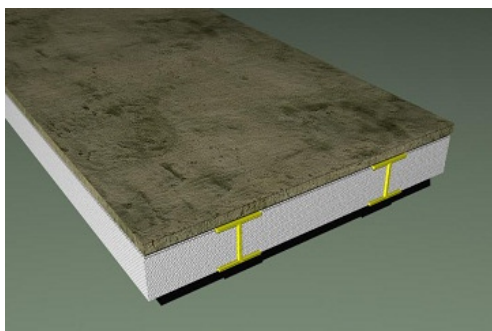


Figura 2.8 Laje mista de concreto/ PRFV (SANTOS NETO, 2006).

Foram utilizados na laje mista perfis pultrudados de PRFV com a seção I de abas largas apresentada na Figura 2.9.

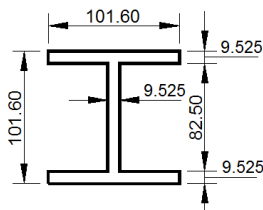


Figura 2.9 Seção (mm) dos Perfis I de abas largas, (SANTOS NETO, 2006).

Os Perfis em PRF, também denominados laminados, são obtidos por meio de camadas de lâminas e cada lâmina é formada por fibras orientadas de maneira aleatória ou em direções preferenciais inseridas em uma matriz polimérica.

A resistência mecânica de um PRF pode ser alterada por meio de mudanças na quantidade de fibras empregada e de sua disposição no composto. As fibras podem ser classificadas quanto a sua disposição em unidirecionais, bidirecionais e aleatórias.

O Perfil I utilizado foi produzido por meio do processo de pultrusão (Figura 2.10), e composto por fibras de vidro, sob a forma de filamentos contínuos unidirecionais, inseridas em uma matriz polimérica do tipo poliéster em fração de volume de 60%.

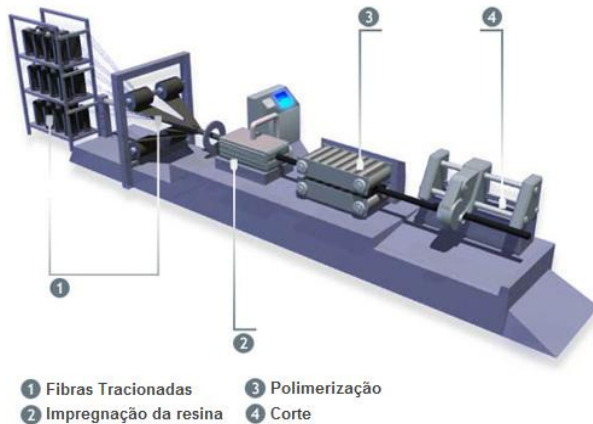


Figura 2.10 Processo de pultrusão (www.exelcomposites.com).

As propriedades mecânicas de cada lâmina foram estimadas pelas equações da micromecânica dos compostos. Utilizando as propriedades individuais da fibra e da resina fornecidas pelo fabricante.

Admitiu-se que as mesas e as almas dos perfis são laminados compostos com propriedades mecânicas ortotrópicas equivalentes nas direções longitudinal e transversal (E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12}). As propriedades dos laminados foram obtidas a partir das propriedades estimadas das lâminas (Tabela 2.1) e orientações das fibras, usando a Teoria Clássica da Laminação (TLC).

Tabela 2.1 Propriedades Elásticas do Perfil, Santos Neto (2006).

Lâmina	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
Manta de filamentos contínuos	7,00	7,00	2,50	0,401
Fibras de filamentos contínuos	48,68	6,56	2,39	0,272
Perfil	35,55	7,02	2,43	0,319

Para verificar as propriedades obtidas teoricamente, Santos Neto (2006) realizou ensaios de flexão simples em espécimes dos perfis, obtendo-se os módulos de elasticidade longitudinal e de cisalhamento, respectivamente E e G . Os valores obtidos a partir dos ensaios são apresentados na Tabela 2.2, confirmando os valores teóricos.

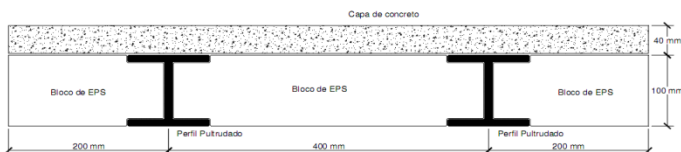
Tabela 2.2 Propriedades dos Perfis I de abas largas, Santos Neto (2006).

Perfil de PRFV	E (GPa)	G (GPa)
CP - 1	30,92	2,64
CP - 2	34,80	2,69
Média	32,86	2,67

O concreto considerado no dimensionamento e utilizado nas lajes possuía uma resistência característica (f_{ck}) de 30 MPa. Para reduzir os efeitos de fissuração por retração plástica do concreto foi definido, por meio de investigação experimental prévia, a utilização de um volume de 0,10% de fibras curtas de polipropileno na capa de concreto da laje.

Foram realizados ainda ensaios experimentais de aderência entre concreto e perfil de PRFV considerando diferentes interfaces. A resina Sikadur 31 foi a interface que apresentou melhor desempenho, sendo então selecionada para ligação entre os dois materiais na laje mista.

No dimensionamento da laje mista foi considerada flexão em uma única direção, coincidente com o eixo longitudinal dos perfis, adotando-se desta forma a analogia de viga em uma fatia representativa da laje, conforme mostra a seção na Figura 2.11.

**Figura 2.11 Seção transversal da laje mista (SANTOS NETO, 2006).**

A dimensão preliminar do comprimento da laje foi definida, por Santos Neto (2006), em função dos limites de deflexão nas condições de construção e serviço, seguindo as seguintes considerações:

I) No primeiro momento foram determinadas cargas construtivas referentes ao peso próprio da laje mista, considerando o concreto ainda no estado fresco. A partir dos pesos específicos dos materiais: concreto, $g_c = 24 \cdot \text{kN/m}^3$, NBR 6118 (2003); perfil pultrudado, $g_{PRF} = 19,5 \cdot \text{kN/m}^3$, CSE composites (2003), e blocos de EPS, $g_{EPS} = 0,18 \cdot \text{kN/m}^3$, ABRAPEX (2001), foi calculado carregamento uniformemente distribuído ao longo do comprimento da laje, somando-se os pesos próprios destes materiais. Em outra situação foi considerado nos cálculos um carregamento de 1,0 kN, no meio do vão, referente ao peso próprio de um operário atuando sobre a laje e o peso próprio da laje (perfis+EPS). Em seguida, para cada uma das situações acima, foi adotado uma flecha limite de $L/250$, para determinar o comprimento máximo da laje mista na etapa construtiva. Este cálculo apresentou os valores de 4,81 m e 4,62 m para o comprimento da laje;

II) Em seguida foi verificada a flecha na situação de serviço (Estado Limite de Serviço – ELS) para a laje, considerando nesta verificação a contribuição resistente da camada de concreto. A estrutura foi calculada como mista, desprezando-se a contribuição do EPS na resistência. Nas análises foi adotado o método da seção transformada. Este cálculo apresentou o valor de 4,50 m para o comprimento da laje, indicando que neste caso o que governa o dimensionamento é o ELS e não a carga construtiva..

Para dimensionamento no ELU, devido à falta de uma norma brasileira para estruturas mistas constituídas de concreto e materiais de PRF foram seguidas as recomendações do ACI Committee 440 (1996) e os procedimentos do ACI 318 (2005), foi utilizado um comprimento de 4,50 metros considerando três modos possíveis de ruptura do sistema: (1) Ruptura por flexão causada pelo esmagamento na fibra mais comprimida da capa de concreto; (2) Ruptura por cisalhamento no perfil de PRFV, na face superior da ligação mesa/alma; e (3) Ruptura da ligação na interface de aderência PRFV/concreto.

Visando a aplicação em passarelas, Santos Neto (2006) adotou um carregamento acidental uniformemente distribuído com intensidade 5 kN/m^2 , sem impacto e atuando sobre toda a área, conforme estabelece a NBR 7188 (1982). O carregamento permanente constitui-se do peso próprio dos materiais além de uma carga uniformemente distribuída de $1,5 \text{ kN/m}^2$, referente ao peso de um elemento de revestimento.

Dos modos de ruptura analisados (Tabela 2.3), o mais crítico foi o de ruptura por cisalhamento na alma do perfil. Neste caso a relação entre esforço último e esforço de cálculo está mais próxima de 2, valor usual para materiais compostos avançados, por se tratar de ruptura frágil (LA ROVERE e SANTOS NETO, 2007).

Tabela 2.3 Esforços e coeficientes, La Rovere e Santos Neto (2007).

Esforços	Modos de Ruptura		
	Flexão	Cisalhamento alma/mesa	Interface concreto/PRFV
Cálculo	$M_d=22,23\text{kNm}$	$V_d=19,76\text{kN}$	$V_d=19,76\text{kN}$
Últimos	$M_u=73,50\text{kNm}$	$V_{u1}=47,85\text{kN}$	$V_{u2}=59,70\text{kN}$
CS	$\phi_f=3,30$	$\phi_{s1}=2,42$	$\phi_{s2}=3,02$

Embora os cálculos tenham apresentado um valor de 4,50 m para o comprimento da laje, Santos Neto (2006) adotou para os ensaios de flexão da laje um comprimento de 2,80 m (vão entre apoios de 2,55 m), em virtude da facilidade na execução do ensaio e também das condições de fornecimento da empresa fabricante do perfil de PRF.

As lajes foram ensaiadas pelo autor adotando-se para a seção transversal as seguintes dimensões: 80 cm de largura por 14 cm de altura, como pode ser observado na Figura 2.11. Os blocos de EPS apresentam dimensões usuais para lajes pré-moldadas de concreto, possuindo neste sistema apenas função de enchimento e, foram confeccionados por uma empresa do estado de Santa Catarina.

Além de respeitar os valores mínimos de espessura previstos em normas, o dimensionamento da laje foi feito buscando que a linha neutra na seção transversal da laje mista ficasse próxima da interface capa de concreto/perfis de PRFV para o carregamento de serviço. Desta forma o desempenho da laje é otimizado, pois o concreto está comprimido e os perfis tracionados. Assim sendo, adotou-se uma espessura de 40 mm para a capa de concreto.

Após o dimensionamento e a realização de alguns ensaios preliminares, Santos Neto (2006) iniciou um programa experimental para investigar o comportamento estrutural da laje mista sob flexão. Foram ensaiadas três lajes mistas de 2800 mm de comprimento e seção 800 mm x 140 mm, submetidas à flexão a quatro pontos. Também foram realizadas uma análise da laje sob flexão por meio da Teoria de Viga de Timoshenko, e uma análise numérica usando o Método dos Elementos Finitos. Nestas análises admitiu-se comportamento elástico-

linear dos materiais, sendo utilizados para as propriedades elásticas tanto valores obtidos experimentalmente como valores estimados, por equação contida na norma brasileira NBR 6118 (2003) para concreto, e pela Teoria Clássica de Laminação (TCL) para os perfis de PRFV. As análises por elementos finitos foram realizadas por meio do programa computacional SAP2000. Na comparação do comportamento estrutural da laje, a partir de gráficos carga x deslocamento no meio do vão, os resultados das análises teórica e numérica apresentaram uma ótima correlação com os resultados experimentais dos ensaios de flexão.

As rupturas nos protótipos das lajes mistas ensaiadas ocorreram de diferentes maneiras: ruptura na alma dos perfis e ruptura na interface concreto/PRFV, de acordo com o esperado no dimensionamento.

A laje mista apresentou um excelente desempenho estrutural sob flexão, tanto para cargas de curta como de longa duração. Porém, devido ao dimensionamento ser dominado pelo ELS, apenas para pequenas travessias o sistema poderia ser utilizado como passarela com os perfis no sentido longitudinal. Para passarelas de vãos maiores, as lajes deverão ser usadas como tabuleiros apoiados em longarinas, com os perfis disposto no sentido transversal.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 Estudo preliminar

Neste estudo preliminar foram usados perfis pultrudados de seção I de abas largas utilizados no trabalho de Santos Neto (2006), e placas de concreto sem adição de fibras, para avaliar procedimentos de ensaio e estimar valores médios de carregamento concentrado a ser aplicado.

As dimensões dos modelos experimentais ensaiados, indicadas na Tabela 3.1, foram definidas a partir das características dimensionais adotadas no sistema de laje mista explorado por Santos Neto (2006)

Tabela 3.1 Dimensões do modelo experimental preliminar.

Elemento	Dimensões dos elementos	
Perfil I de abas largas	Seção transversal	Comprimento dos perfis
	Figura 2.9	50 cm
Placa de concreto	Área da placa	Espessura da placa
	50 cm x 50 cm	4 cm

Foram ensaiadas duas placas de concreto, simplesmente apoiadas em dois bordos, utilizando o mesmo par de perfis pultrudados, conforme mostra o esquema apresentado na Figura 3.1.

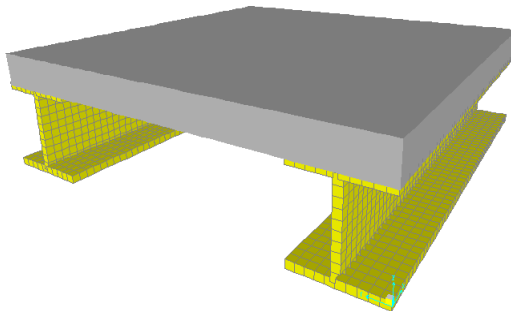


Figura 3.1 Modelo experimental preliminar.

Na produção dos modelos preliminares foram utilizados materiais (areia, pedra britada e cimento) disponíveis em laboratório, com características similares àsquelas observadas nos materiais utilizados por Santos Neto (2006) para produção das lajes ensaiadas a flexão.

Manteve-se inicialmente a dosagem de concreto empregada por Santos Neto (2006), porém, devido a variações nas propriedades dos materiais fizeram-se necessárias algumas correções nas proporções destes para que pudessem ser alcançadas as características desejadas em relação à trabalhabilidade. Dessa forma ficou estabelecido o seguinte traço de dosagem em massa 1:2,18:2,82:0,52. Formas descartáveis foram produzidas e após o procedimento de concretagem os protótipos foram mantidos em cura úmida até alcançar a idade de 28 dias.

3.1.1 Ensaio preliminar de carga concentrada

O ensaio de carga concentrada foi realizado em uma prensa mecânica, com velocidade de carregamento controlada manualmente. O carregamento aplicado ao sistema foi monitorado por meio de uma célula de carga com capacidade de 200 kN. A leitura de deslocamentos da placa foi realizada por meio de 4 transdutores lineares de deslocamento (LVDT's), marca HBM e faixa de leitura de 20 mm, fixados por base magnética. Após a fixação de todos os medidores, Figura 3.2, um sistema de aquisição de dados foi instalado.



Figura 3.2 Instrumentação do ensaio preliminar.

A área de aplicação do carregamento sobre a laje foi definida por meio de uma avaliação do tamanho das rodas de carros de manutenção e sua área de contato, tendo em vista a possibilidade de carregamento concentrado extremo ocorrer sobre a laje durante sua utilização. Por fim, o carregamento foi aplicado em uma região de 5 cm x 10 cm a uma

velocidade de aplicação mantida em 1,5 kN/s. Os corpos de prova foram simplesmente apoiados nas duas mesas dos perfis pultrudados de PRFV, na tentativa de simular o sistema laje mista de concreto/PRFV estudado por Santos Neto (2006).

Observou-se durante o procedimento de ensaio dos protótipos que as extremidades da placa, estando estas simplesmente apoiada sobre os perfis, deslocavam-se em relação a parte exterior da mesa dos perfis apoiando-se na extremidade interior da mesa.

Durante o carregamento, logo após a laje apresentar este comportamento de flexão sobre a extremidade interior das mesas dos perfis, ocorreu o aparecimento de uma fissura por flexão paralela aos perfis (Figura 3.3). Esta fissura teve início na face inferior da placa, desenvolvendo-se com o acréscimo de carga, percorrendo a espessura até alcançar a face superior da placa e esta entrar em colapso.



Figura 3.3 Abertura de fissura na placa de concreto.

Este protótipo experimental preliminar auxiliou para verificar a importância da aderência entre perfil e concreto de forma a se pensar em um novo modelo experimental que levasse em conta este aspecto.

A partir destes resultados foi iniciado um estudo numérico para avaliar o comportamento do sistema de laje mista quando submetido a um carregamento concentrado e identificar possíveis formas de corpos de prova que pudessem representar da maneira mais adequada o comportamento da laje.

3.2 Definição de um modelo numérico e experimental

O comportamento observado nos ensaios com o protótipo experimental preliminar mostrou a importância da consideração do fator de aderência entre perfil e placa de concreto. Entretanto, para considerar esta aderência em ensaio experimental, haveria necessidade de se utilizar o mesmo procedimento utilizado por Santos Neto (2006) na preparação da superfície entre o perfil e a capa de concreto. Isto faria com que um par de perfis fosse necessário para cada ensaio o que oneraria e possivelmente inviabilizaria a execução do programa experimental apresentado no capítulo 4.

Desta forma, procurou-se simplificar os corpos de prova para ensaiar placas que representassem a região da capa de concreto da laje mista submetida a esforços concentrados. A idéia inicial era procurar dimensões de placas que pudessem ser ensaiadas bi-apoiadas e que tivessem vãos similares aos da capa de concreto em suas regiões de momento positivo.

Por este motivo foi realizada uma análise numérica pelo método dos elementos finitos, utilizando o programa SAP2000 (2009). Foram utilizados na malha de elementos finitos do modelo da laje mista elementos de casca fina de 4 nós, para modelar os perfis de PRFV e elementos sólidos de 8 nós (com modos incompatíveis de Wilson), para modelar a capa de concreto. A Figura 3.4 apresenta a malha de elementos finitos utilizada no modelo numérico da laje mista.

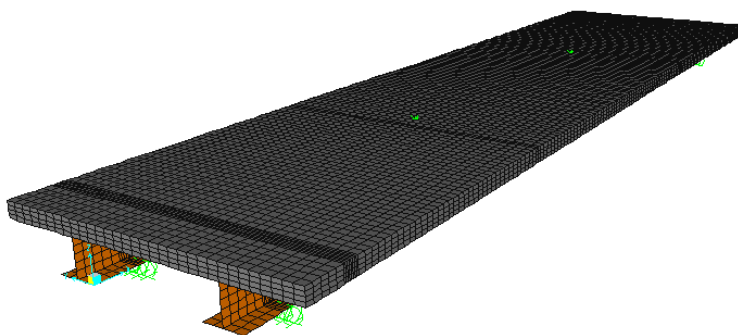


Figura 3.4 Malha de elementos finitos da laje mista.

As propriedades utilizadas na análise numérica da laje mista, para concreto e perfis I pultrudados de abas largas, foram adotadas em função dos resultados obtidos por Santos Neto (2006). Na Tabela 3.2 são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizadas no modelo numérico da laje mista, considerando-se o concreto material isotrópico e as mesas e alma do perfil pultrudado de PRFV material ortotrópico equivalente.

Tabela 3.2 Propriedades adotadas no modelo de elementos finitos.

Concreto ($fck = 30MPa$)			
Massa específica (γ_c)	25 kN/m^3		
Módulo de Elasticidade (E)	35,6 GPa		
Módulo de Cisalhamento (G)	14,8 GPa		
Coefficiente de Poisson (ν)	0,2		
Mesas e Alma do Perfil I de abas largas (PRFV)			
Massa específica (γ_p)	19,8 kN/m^3		
Módulo de Elasticidade (E_1, E_2, E_3)	35,55 GPa	7,02 GPa	7,02 GPa
Módulo de Cisalhamento (G_1, G_2, G_3)	2,43 GPa	1,00 GPa	1,00 GPa
Coefficiente de Poisson (ν_1, ν_2, ν_3)	0,319	0,38	0,38

A partir dos resultados obtidos por meio do modelo numérico da laje mista em estudo foram avaliados deslocamentos relativos (Δd) entre capa de concreto e perfil, sendo Δd a distância mostrada na Figura 3.5.

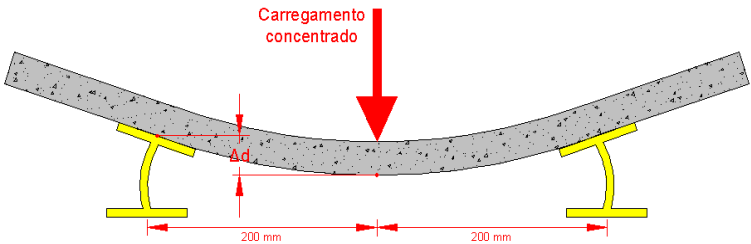


Figura 3.5 Deslocamento relativo entre capa e perfil (Δd).

Um carregamento concentrado de 10 kN, estimativa de carga realizada a partir do ensaio experimental preliminar, foi considerado atuando sobre uma área de 5 cm x 10 cm (50 cm²) e aplicado em duas regiões da laje mista: sobre o centro do vão da laje, situação mostrada na Figura 3.6, e sobre a região dos apoios, como mostra a Figura 3.7. Verificou-se que a posição sobre os apoios fornecia um deslocamento relativo (Δd) maior.

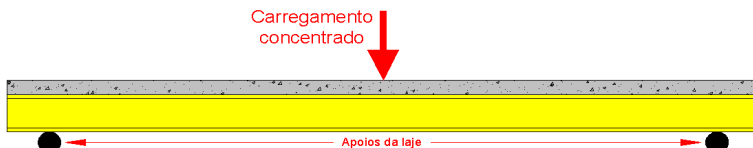


Figura 3.6 Carregamento concentrado sobre o centro do vão da laje.

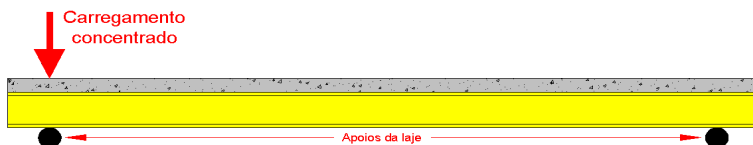


Figura 3.7 Carregamento concentrado sobre os apoios da laje.

Primeiramente foi realizada uma análise numérica para comparar deslocamentos relativos (Δd) no modelo da laje mista com um vão entre perfis e da laje mista com três vãos entre perfis (Figura 3.8). O modelo de laje mista analisado com um e três vãos entre perfis possuía um comprimento total de 2,80 m e vão entre apoios de 2,55 m.

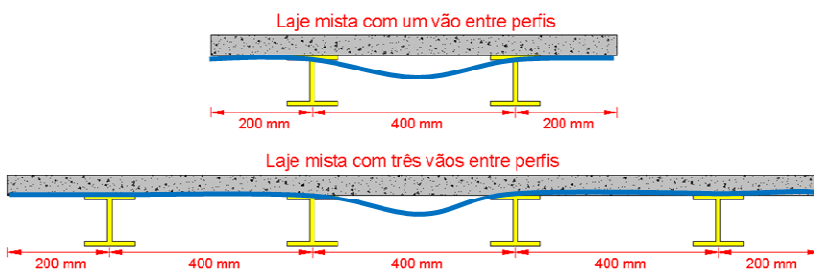


Figura 3.8 Sistema de laje Mista com um e três vãos entre perfis.

Os resultados desta primeira análise mostraram que não houve diferença considerável entre deslocamentos relativos (Δd) com aumento da quantidade de vãos entre perfis no sistema de laje mista, porém, a região de carregamento sobre os apoios apresentou os maiores valores em termos de deslocamentos relativos, sendo observados os valores indicados no diagrama da Figura 3.9.

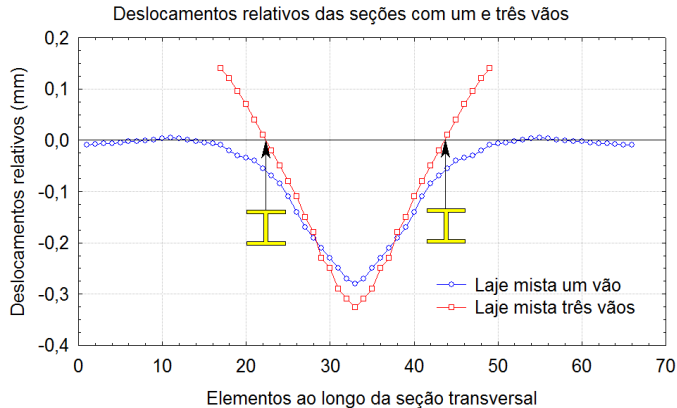


Figura 3.9 Deslocamentos relativos no apoio das seções de lajes.

A conclusão principal desta primeira análise foi de que seria indiferente trabalhar com uma laje de maior numero de vãos entre perfis ou com uma laje de um único vão entre perfis. A importância desta verificação é o fato de que trabalhar com modelos numéricos menores agiliza o processo de análise dos modelos e facilita os procedimentos de avaliação dos mesmos.

Por meio da avaliação de tensões normais paralelas a seção transversal da laje mista no modelo numérico da laje com um único vão entre perfis e carregamento concentrado sobre a região dos apoios, Figura 3.10, foi observada a linha de contra flecha na capa de concreto.

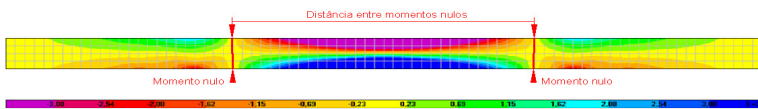


Figura 3.10 Contra flecha e momentos nulos na capa de concreto.

Nesta região onde ocorre a linha de contra flecha (Figura 3.11) as tensões normais paralelas à seção transversal por flexão são nulas, portanto, pode ser definida uma distância entre linhas de contra flecha para qual o comportamento apresentado seria aproximado ao de uma viga bi-apoiada, neste caso com um vão de 32 cm.

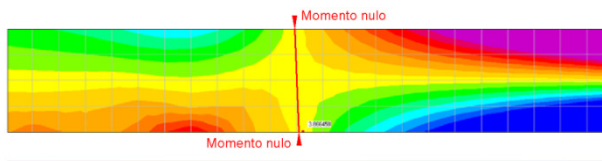


Figura 3.11 Região de contra flecha e momento nulo.

Considerando a idéia de trabalhar com elementos simplesmente apoiados, ao invés de trabalhar com todos os componentes do sistema: perfil e capa de concreto, foram propostos alguns modelos de placas. Estes modelos de placas, simplesmente apoiadas, surgiram na intenção de representar a atuação conjunta dos elementos perfil pultrudado e capa de concreto no sistema de laje mista.

Três modelos de placas de concreto são avaliados (Figura 3.12):

- Modelo 1: placa (dimensões 70 cm x 40 cm) com duas linhas de apoio contínuas e distantes entre si 32 cm;
- Modelo 2: placa (dimensões 70 cm x 40 cm) apoiada sobre duas linhas de três apoios pontuais distantes 32 cm;
- Modelo 3: placa (dimensões 134 cm x 40 cm) apoiada sobre duas linhas de três apoios pontuais distantes 32 cm.

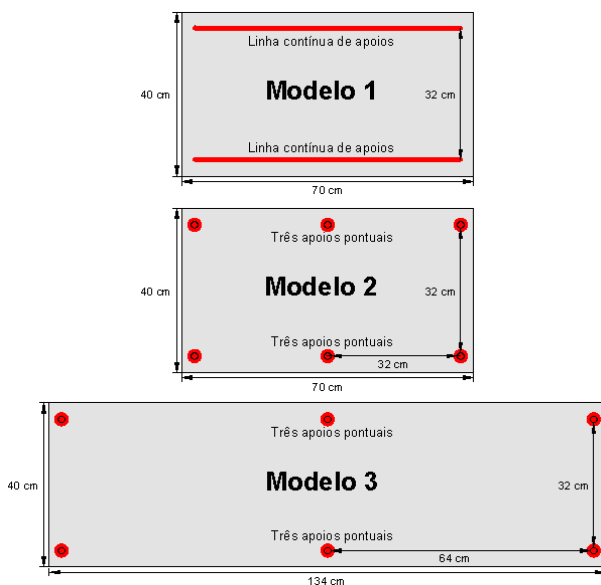


Figura 3.12 Modelos de placas propostos.

Em todos os modelos numéricos de placas analisados, as propriedades do concreto foram mantidas como na análise numérica da laje mista e o carregamento considerado concentrado sobre um único nó, ou seja, um único ponto de aplicação de carga.

Os resultados de deslocamentos relativos, obtidos da análise numérica dos modelos de placas e da laje mista com um vão entre perfis, são apresentados na Tabela 3.3. A comparação entre os resultados mostra que os modelos com três apoios pontuais apresentam valores mais similares aos da laje mista.

Tabela 3.3 Deslocamentos relativos (Δd) nos modelos propostos.

Modelo numérico	Laje mista	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Deslocamento (mm)	0,165	0,118	0,148	0,157

O modelo numérico de placa que apresentou os melhores valores de correlação quanto a deslocamentos relativos com a laje mista foi o “Modelo 3 (134 cm x 40 cm e apoios pontuais)”, entretanto, nesta pesquisa existe ainda o interesse em encontrar um modelo mais simples de implementar experimentalmente e por este motivo foi adotado para os modelos experimentais placas de concreto com 100 cm x 40 cm e apoios pontuais, conforme mostra a Figura 3.13, por motivos de movimentação e armazenamento das placas de concreto em laboratório. A análise numérica desta placas apresenta deslocamento relativo (Δd) igual a 0,152 mm, valor intermediário entre o modelos 2 e 3.

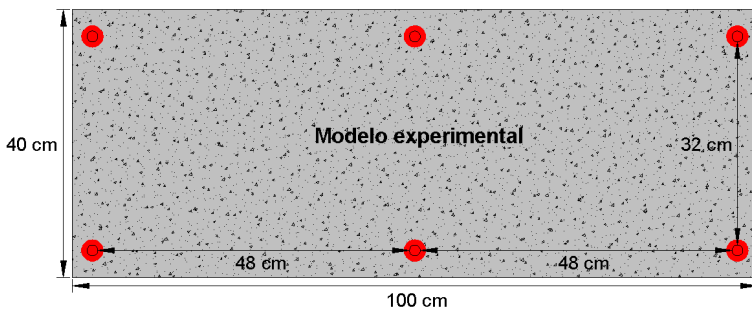


Figura 3.13 Modelo experimental adotado.

3.3 Sistema de laje mista com perfis I de abas curtas

Para sequência e desenvolvimento do projeto de pesquisa, no qual está inserido este trabalho de mestrado, foram necessárias alterações no sistema originalmente proposto devido a modificações nas dimensões dos perfis fabricados pelo fornecedor, que passou a fabricar perfis de seção I de abas curtas ao invés de I de abas longas.

Ao se empregar perfis pultrudados com seção transversal de dimensões diferentes da seção utilizada por Santos Neto (2006), como mostra a Figura 3.14, tornou-se necessário refazer o dimensionamento da laje mista, verificando-se suas dimensões.

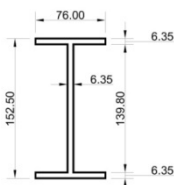


Figura 3.14 Seção do perfil I de abas curtas (mm).

A alteração nas dimensões do perfil implica também na necessidade de reavaliação da rigidez à flexão do mesmo. Houve uma diminuição na espessura das paredes do perfil (mesa e alma), além de modificações na altura do perfil e largura das mesas.

A rigidez à flexão da nova seção do perfil foi estudada por Canalli (2010), outro membro do projeto de pesquisa da laje mista, que avaliou as propriedades do perfil por meio de métodos analíticos e experimentais. Apresentou como estimativa analítica das propriedades das paredes do perfil os valores mostrados na Tabela 3.4, em que os eixos locais (x, y) estão mostrados na Figura 3.15.

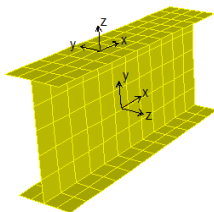


Figura 3.15 Sentido dos eixos locais (CANALLI, 2010).

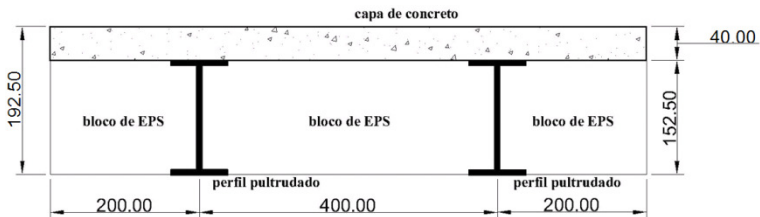
Tabela 3.4 Propriedades dos laminados que compõe as paredes do perfil.

E_x	E_y	G_{xy}	ν_{xy}
26,727 GPa	7,190 GPa	3,818 GPa	0,341

O dimensionamento da laje mista considerando a nova seção do perfil segue a mesma metodologia utilizada por Santos Neto (2006) e descrito no item 2.6. O procedimento de dimensionamento, para a seção com novos perfis foi realizado por Junges (2010), usando para o concreto propriedades estimadas e para os perfis propriedades obtidas de maneira experimental.

Os resultados das verificações mostraram que a nova seção da laje mista permitiria um valor de 4,80 m para o vão máximo no comprimento da laje, porém, ficou estabelecido para futuros ensaios de flexão da laje mista um vão máximo de 4,00 m, devido à facilidade na movimentação e execução de ensaios.

Na Figura 3.16 é apresentada a seção transversal redimensionada da laje mista. Apesar de modificada a seção dos perfis, neste novo sistema a altura da capa de concreto não foi alterada, permanecendo o valor de 40 mm.

**Figura 3.16 Seção da laje com perfis I de abas curtas (mm).**

3.3.1 Influências de modificações na seção transversal

Sistemas de materiais mistos são usualmente empregados de maneira que se aproveite de ambos os materiais as suas melhores características, como é o caso da laje mista de concreto e perfis pultrudados. Desde que seja mantida a linha neutra atuando na interface entre concreto e perfil, para esforços de flexão, o concreto estará comprimido e o perfil tracionado. Além disso, o concreto contribui para a estabilidade e a rigidez do conjunto.

Quando chegaram os novos perfis pultrudados I de abas curtas não se conheciam suas propriedades. O fabricante não havia fornecido ainda as propriedades das lâminas que compunham as paredes do perfil. Assim optou-se por fazer um estudo analítico e paramétrico dos efeitos na espessura da capa de concreto caso o perfil mantivesse seu módulo elasticidade (E_{perfil}) e modificasse apenas sua altura, ou mantivesse a altura e modificasse seu módulo (E_{perfil}).

Este estudo foi realizado por meio do roteiro de dimensionamento da laje mista apresentado por Junges (2010), variando a altura do perfil e valores de seu módulo e observando a espessura da capa de concreto necessária para garantir o correto posicionamento da linha neutra na interface entre materiais e funcionamento do sistema misto.

O diagrama mostrado na Figura 3.17 apresenta a variação na espessura da capa de concreto para diferentes alturas de um perfil, considerando o módulo de elasticidade definido experimentalmente e as dimensões do perfil utilizado por Santos Neto (2006).

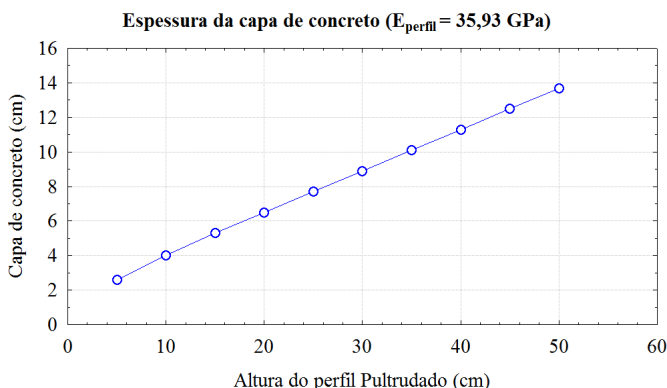


Figura 3.17 Espessura da capa x altura do perfil.

O diagrama mostrado na Figura 3.18 apresenta a variação na espessura da capa de concreto para diferentes valores de módulo elasticidade longitudinal das paredes do perfil pultrudado, considerando as dimensões do perfil usado por Santos Neto (2006).

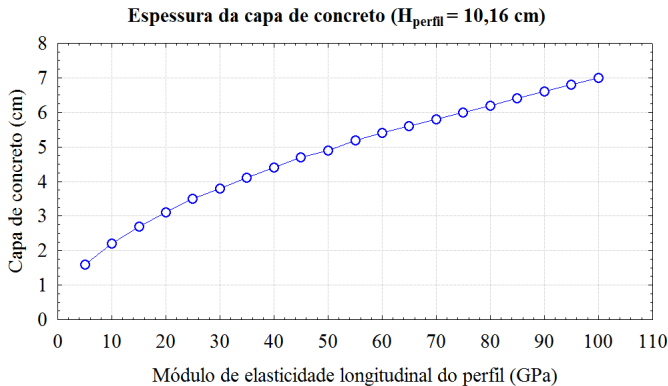


Figura 3.18 Espessura da capa x módulo de elasticidade do perfil.

O estudo sobre variação na espessura da capa de concreto mostrou a importância de serem avaliadas diferentes espessuras de placas, pois podem ocorrer modificações tanto da altura do perfil quanto nos valores de módulo (E_{perfil}), tornando-se necessário o redimensionamento da capa de concreto.

Nos diagramas para perfis com alturas entre 10 e 30 cm e módulo de elasticidade (E_{perfil}) entre 20 e 50 GPa, foi observada variação na espessura da capa de concreto de 3 a 10 cm. Entretanto, neste trabalho optou-se por utilizar uma faixa intermediária, adotando-se valores de 4, 5 e 6 cm, como mostra a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Estimativa analítica das propriedades do perfil.

Dimensões da placa de concreto	100 cm x 40 cm		
Distância mínima entre apoios	32 cm entre apoios transversais		
Espessuras da capa de concreto	4 cm	5 cm	6 cm

Tais modificações podem influenciar também na distribuição de esforços na seção, porém, a análise numérica da laje mista com a nova configuração do sistema não apresentou alteração considerável no posicionamento da linha de contra flecha na capa de concreto. Portanto, o afastamento de 32 cm entre apoios pontuais, proposto no modelo de placa, foi mantido para os ensaios experimentais.

3.4 Ensaios experimentais com fibras de polipropileno

Santos Neto (2006), como descrito no item 2.6, avaliou a incorporação de fibras curtas de polipropileno (microfibras) ao concreto quanto à fissuração por retração plástica, concluindo que um teor de fibras de pelo menos 0,10 % seria necessário. Adotou assim o teor de 0,10% para a execução da capa de concreto na laje mista.

Porém, neste trabalho buscou-se avaliar a influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento estrutural da laje mista quando submetida a um carregamento concentrado com velocidade controlada ou então quando submetida a carga de impacto.

Algumas pesquisas sobre funcionamento em lajes de concreto armado (HARAJI et al, 1995; ZAMBRANA VARGAS, 1997), citadas anteriormente, mostram que melhorias no funcionamento estrutural de lajes podem ser alcançadas com a incorporação fibras de polipropileno ou de aço para teores de fibras acima de 1%, respectivamente.

Outros trabalhos, sobre resistência a cargas de impacto em placas de concreto (PINTO et al, 2004; PINTO et al, 2005), confirmam que a adição de fibras de polipropileno em teores de 0% a 1,50% podem auxiliar na resistência ao impacto.

Portanto, foram adotados nesta pesquisa diferentes teores e tipo de fibras (micro e macro fibras), conforme observado na Tabela 3.6, para avaliar o comportamento estrutural da laje mista quando submetida a carregamentos concentrados, seja, por carregamento estático (aplicado de forma monotônica e crescente) ou carga de impacto.

Tabela 3.6 Teores de fibras de polipropileno das misturas.

Tipo de fibra	Referência	Microfibra	Macrofibra	Macrofibra
Percentual de fibras	0%	0,10%	1%	2%

A escolha dos tipos e teores de fibras foi realizada a partir da pesquisa sobre a influência de fibras curtas de polipropileno na retração desenvolvido por Santos Neto (2006) e estudos apresentados na revisão bibliográfica.

Dois tipos de fibras de polipropileno, fornecidas pela empresa *Neo Matex*, foram utilizados nos ensaios experimentais:

- *NeoFibra MF* (Figura 3.19): microfibra de polipropileno, composta por filamentos de polipropileno extremamente finos obtidos por meio de extrusão. Após receberem tratamentos

superficiais que facilitam a dispersão no concreto, os filamentos são cortados dando origem às microfibras de polipropileno. Atuam principalmente na fase plástica do concreto, reduzindo a incidência de fissuras de retração plástica e de assentamento e controlando a exsudação e a segregação do concreto. São quimicamente inertes e possuem elevada resistência alcalina.



Figura 3.19 Aspecto das fibras NeoFibra MF.

- *Fibra Durus* (Figura 3.20): macrofibra sintética estrutural de polipropileno, composta por monofilamentos obtidos por extrusão, ondulados e cortados. Aumentam a tenacidade do concreto e a resistência ao impacto, são quimicamente inertes e possuem alta resistência a álcalis, ácidos e sais.



Figura 3.20 Aspecto das fibras do tipo Durus.

As propriedades destas fibras são mostradas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Propriedade das fibras de polipropileno.

Densidade (g/cm ³)	0,91
Resistência à Tração (MPa)	0,5 - 0,75
Módulo de Elasticidade (GPa)	1 – 7,7
Ponto de Fusão (°C)	160
Resistência Alcalina	alta

4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os procedimentos realizados para a produção das placas de concreto, instrumentação e procedimentos para a realização dos ensaios de carga concentrada estática e de impacto.

4.1 Produção das placas de concreto

Inicialmente foi realizado um estudo de traços de concreto sem aditivos (Anexo A) para definir a proporção de materiais para uma resistência a compressão característica (f_{ck}) de 30 MPa considerando um desvio padrão de 4 MPa conforme a NBR 12655. A dosagem obtida no estudo de traços foi 1:1,95:2,62:0,51.

Para concretos com adição de fibras estruturais de polipropileno do tipo Durus foi realizado um estudo de trabalhabilidade do concreto, baseado na adoção do teor adequado de aditivo plastificante para obtenção de um abatimento de 10 ± 1 cm, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Misturas de concreto utilizadas.

Mistura	Referência	Microfibra	Durus1%	Durus2%
Informações	Sem fibras	0,1% microfibra	1% macrofibra	2% macrofibra
	Sem aditivo	Sem aditivo	0,7% plastificante	0,8% plastificante

Para cada mistura foram concretadas nove placas de 100 x 40 cm; três placas com espessura de 4 cm, três com espessura de 5 cm, e finalmente outras três com espessura de 6 cm. Após o término das concretagem as placas foram curadas pelo período de 28 dias.

Além das placas, foram confeccionados 6 corpos-de-prova cilíndricos, de seção 100 x 200 mm, para a realização de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados imediatamente antes do ensaio das placas, utilizando uma prensa *marca Shimadzu*, com capacidade de 2000 kN. Os resultados médios obtidos estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Resistência à compressão média e módulo de elasticidade.

Mistura	Referência	Microfibra	Durus1%	Durus2%
f_c (MPa)	43,5	43,6	33,5	33,4
Mód. Elasticidade (GPa)	29,9	29,9	29,9	27,9

4.2 Ensaios de carga concentrada

4.2.1 Carga concentrada estática

O ensaio das placas de concreto com carga concentrada estática foi realizado no Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

Ao todo foram ensaiadas nove placas de concreto, com carregamento concentrado aplicado monotonicamente crescente até a ruptura da placa. Adotou-se uma taxa de carregamento 3,5 kN/min, semelhante ao utilizado por Santos Netos (2006) nos ensaios de flexão da laje mista na primeira fase do projeto de pesquisa na UFSC.

A partir do modelo numérico do item 3.2, foram dispostos seis apoios pontuais distantes de 32 cm, conforme mostra a Figura 4.1.

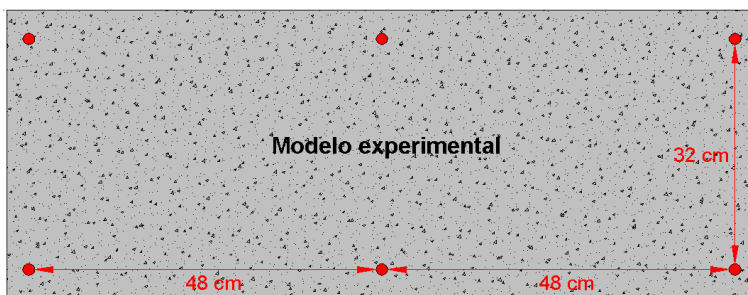


Figura 4.1 Modelo de experimental adotado.

O aparato de ensaio utilizado para aplicação de carga concentrada foi um sistema composto por uma base de neoprene, esfera e copo de acoplamento metálico. Este sistema possibilitou que ajustes de posicionamento fossem realizados no aparato de carregamento antes do início de cada ensaio. A Figura 4.2 apresenta um esquema representando a disposição dos equipamentos no ensaio de carga concentrada estática.

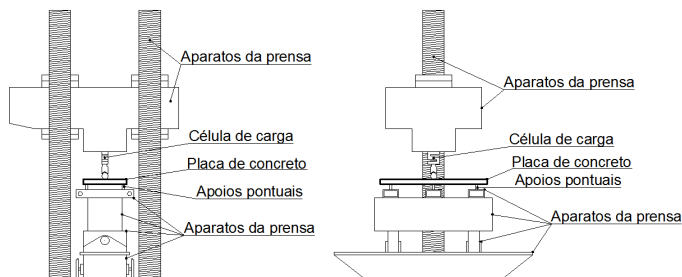


Figura 4.2 Esquema do ensaio de carga concentrada estática.

O carregamento foi aplicado por meio de uma prensa hidráulica marca *Losenhausenwerk*, de capacidade de carga 3000 kN. A leitura do carregamento aplicado foi realizada a partir de uma célula de carga, previamente calibrada, marca *Kratos* com capacidade de 5 kN, ligada a um sistema de aquisição de dados.

Antes do início do ensaio, aplicou-se um carregamento de 2 kN para garantir o perfeito acomodamento dos dispositivos do ensaio, o qual foi retirado em seguida para início do experimento.

Para melhor acomodação do aparato de aplicação de carga e minimizar o possível efeito de esmagamento do concreto, foram colocadas placas de contato de neoprene na região de carregamento também sobre os apoios.

O deslocamento vertical em pontos simétricos da placa foi medido por meio de quatro Transdutores Lineares de Deslocamento (LVDT's), marca HBM, com campo de leitura de 20 mm, dispostos aos pares em pontos simétricos, distantes 10 cm do ponto de aplicação de carga e ligados ao sistema de aquisição de dados. A Figura 4.3 apresenta o posicionamento do aparato de carga e dos LVDT's.

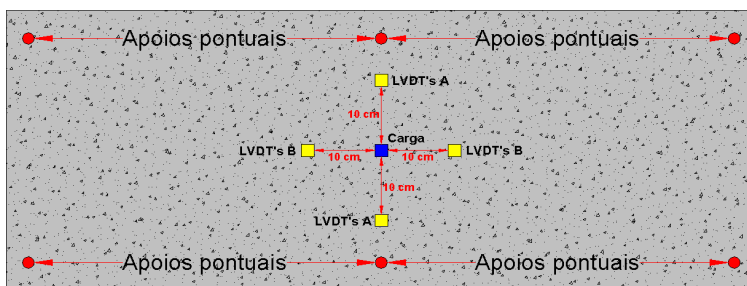


Figura 4.3 Posicionamento do aparato de carga e LVDT's.

A Figura 4.4 apresenta detalhes do posicionamento e fixação dos LVDT's utilizados na medição de deslocamentos verticais nas placas de concreto; pode ser visto também a fixação das bases magnéticas.



Figura 4.4 Detalhes no posicionamento dos LVDT's.

Os dados de todos os sensores foram coletados num sistema de aquisição de dados, marca *HBM-Spider*, com 16 canais. Após o término do ensaio, os dados das leituras eram salvos em um arquivo formato “*Excel*”, para posterior análise dos resultados.

4.2.2 Carregamento de impacto

A resistência ao impacto de misturas de concreto reforçadas com fibras é usualmente avaliada por meio do método proposto pelo Comitê ACI 544, a partir de corpos-de-prova cilíndricos com 160 mm de diâmetro e 60 mm de altura.

Alternativamente, os pesquisadores SCHMIDT et al (2001) apresentaram uma variação do ensaio anterior para avaliação da resistência ao impacto, mantendo a massa em queda livre, porém utilizando pequenas lajes quadradas de dimensões 400 x 400 x 20 mm totalmente apoiadas em seus bordos. Este foi o método adotado neste trabalho, pela fácil adaptação das placas de concreto para este método.

Estas placas foram obtidas a partir das placas de 100 x 40 cm utilizadas nos ensaios de carga concentrada. Conforme será discutido no item 5.1, a ruptura em grande parte das placas foi caracterizada por uma fissura que dividia a placa ao meio, como mostra a Figura 4.5.



Figura 4.5 Ruptura característica das placas.

Assim, cada ensaio de carga concentrada estática, potencialmente possibilitava a obtenção de duas placas para ensaios de impacto.

Estas partes das placas de concreto foram inspecionadas e selecionadas visualmente, sendo descartadas aquelas que apresentassem fissuras ou tamanho insuficiente que impossibilita-se a formação de uma placa com dimensões de 400x400 mm.

A avaliação da resistência ao impacto das placas foi efetuada a partir do aparato de ensaio sugerido pelos pesquisadores SCHMIDT et al (2001), e apresentado esquematicamente na Figura 4.6.

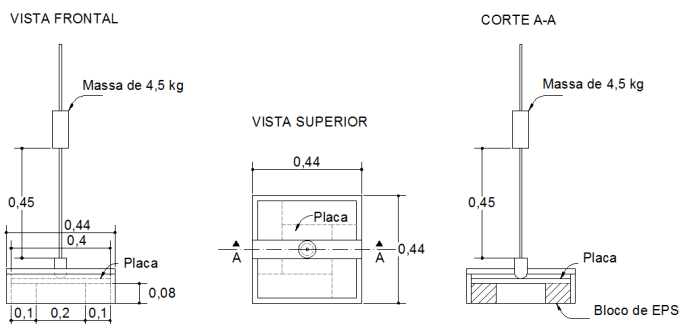


Figura 4.6 Esquema do ensaio de impacto (m).

Neste ensaio, a resistência ao impacto das placas é relacionada com o número de golpes necessário para que ocorra a ruptura total da placa, quando submetida a impactos consecutivos de uma massa de 4,5 kg caindo a uma altura de 45 cm no centro geométrico da placa (energia da ordem de 20 Nm por impacto). A placa é simplesmente apoiada ao longo de 10 cm, por todo seu perímetro, em uma camada de EPS (Poliestireno expandido) de 8 cm de espessura, ficando desta forma, uma região quadrada de 20 x 20 cm de placa sem suporte.

5 RESULTADOS: APRESENTAÇÃO E COMENTÁRIOS

5.1 Resultados de carga concentrada estática

A Tabela 5.1 apresenta a carga de ruptura observada em cada ensaio de placa sem e com adição de fibras. Estes valores foram obtidos a partir de diagramas carga x deslocamento.

Tabela 5.1 Carga de ruptura das placas ensaiadas (kN).

Misturas	Placas de 4 cm				Placas de 5 cm				Placas de 6 cm			
	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%
A	10,2	7,3	7,2	8,5	10,3	10,0	11,2	11,4	13,8	12,1	16,4	12,4
B	5,6	9,5	8,4	10,2	12,3	10,0	14,3	13,6	8,4	15,5	14,4	13,3
C	8,9	10,2	5,0	6,8	8,4	13,2	10,9	10,2	14,0	11,1	10,7	15,2
Média	8,3	9,0	6,9	8,5	10,3	11,1	12,1	11,7	12,0	12,9	13,9	13,7
Desvio Padrão	2,4	1,5	1,7	1,7	2,0	1,8	1,9	1,7	3,2	2,3	2,9	1,4

Seguindo o procedimento descrito em Prudêncio Jr. (2002) procedeu-se a análise dos resultados para verificar se não existiam valores espúrios que deveriam ser descartados a um nível de significância de 5%, não sendo observados resultados espúrios.

O diagrama de dispersão dos resultados apresentado na Figura 5.1 mostra, como esperado, que para todas as misturas houve uma tendência de crescimento da carga de ruptura para acréscimos na espessura.

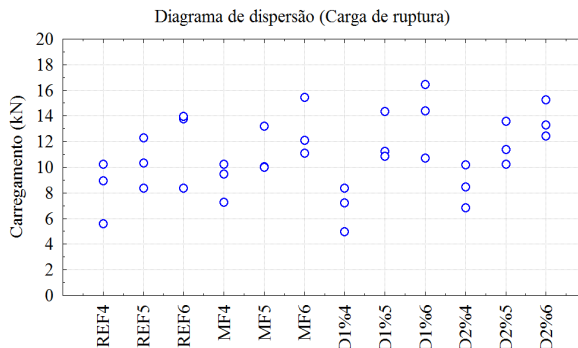


Figura 5.1 Dispersão dos resultados de ruptura das placas.

O comportamento quanto carga de ruptura das misturas pode ainda ser representado por meio do diagrama de caixas da Figura 5.2, que reforça a idéia de uma tendência crescente na carga de ruptura relacionada a acréscimos na espessura, quando observadas as médias.

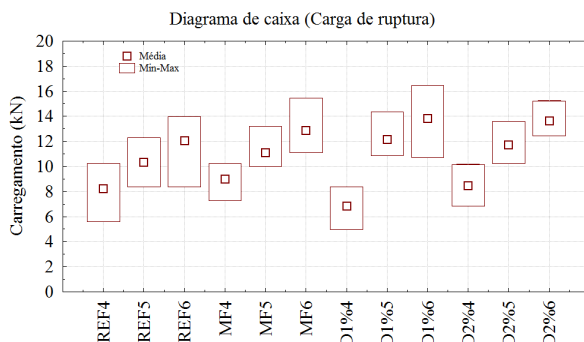


Figura 5.2 Diagrama de caixas da carga de ruptura das placas.

A ruptura típica das placas de concreto observada nos ensaios ocorreu como mostra a Figura 5.3. São apresentadas no Anexo B imagens da ruptura das placas mostradas respectivamente por tipo de fibra incorporada e espessura



Figura 5.3 Ruptura das placas de concreto (superfície inferior).

Em praticamente todos os ensaios a forma de ruptura observada foi o aparecimento de uma fissura ligeiramente inclinada na direção transversal da placa de concreto que se iniciava nos apoios e percorria a parte inferior, alcançando a face lateral da placa e subindo em direção a parte superior até a ruptura.

Utilizando os resultados de carga e deslocamento foram traçados diagramas com a média entre os pares A e B de LVDT's, posicionados conforme mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Contudo, serão apresentados e avaliados a seguir somente dados referentes à média entre o par de LVDT's A.

As Figuras 5.4 a 5.6 apresentam o diagrama carga x deslocamento das placas com espessuras 4, 5 e 6 cm sem adição de fibras. Nota-se que estas placas não apresentaram um comportamento uniforme, ou seja, houve variação visível da carga de ruptura e na inclinação da fase inicial das curvas (rigidez).

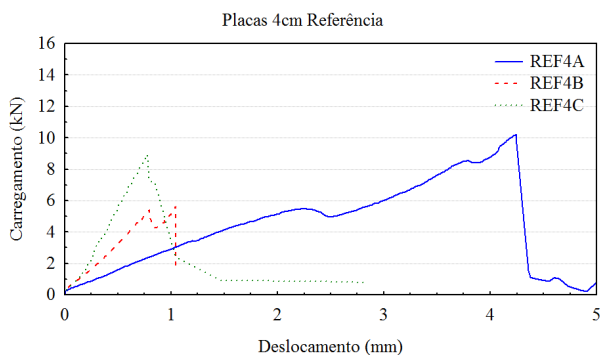


Figura 5.4 Comportamento carga x deslocamento placas REF4.

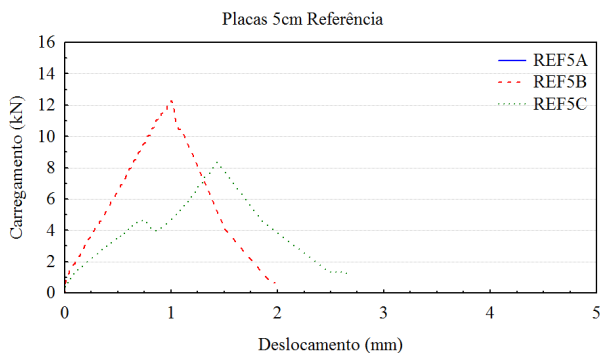


Figura 5.5 Comportamento carga x deslocamento placas REF5.

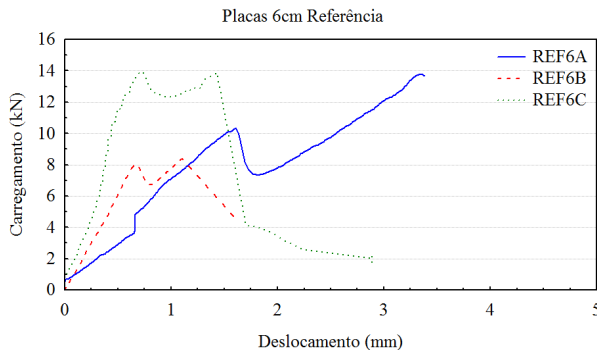


Figura 5.6 Comportamento carga x deslocamento placas REF6.

Comparando-se, curvas carga x deslocamento das placas REF4B, REF5C e REF6B, que apresentaram um comportamento intermediário, observa-se a partir da Figura 5.7 que a espessura pode ter influenciado inclinação da fase inicial das curvas (rigidez).

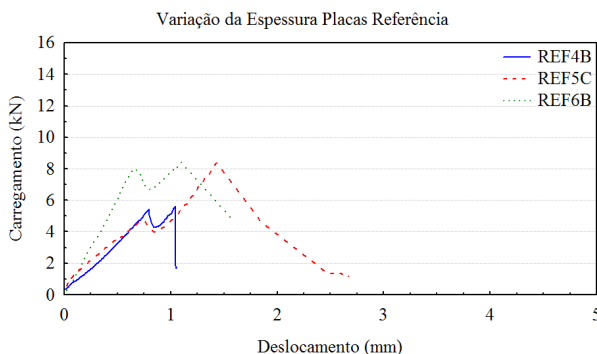


Figura 5.7 Comportamento de placas intermediárias REF.

Nas placas de concreto com adição de 0,1% de microfibras, verificou-se nos diagramas uma maior uniformidade de comportamento quanto à carga de ruptura e rigidez das placas. As Figuras 5.8 a 5.10 mostram a relação carga x deslocamento para placas de concreto de adição de 0,1% de microfibras.

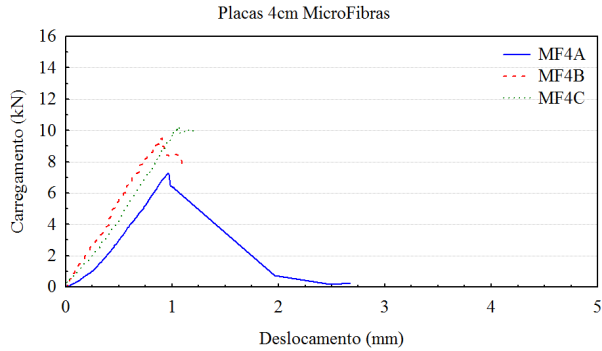


Figura 5.8 Comportamento carga x deslocamento da placas MF4.

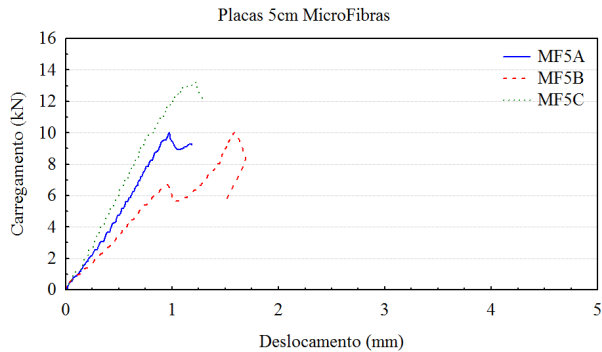


Figura 5.9 Comportamento carga x deslocamento da placas MF5.

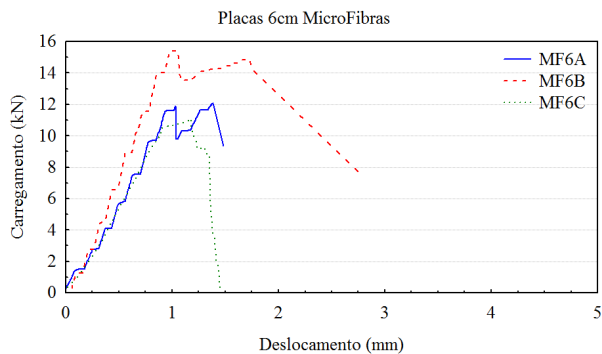


Figura 5.10 Comportamento carga x deslocamento da placas MF6.

Assim como na análise dos resultados de placas sem adição fibras (mistura referência) para placas com adição de microfibras, foi possível verificar, por meio da relação carga x deslocamento apresentada na Figura 5.11, a variação da rigidez em placas de comportamento intermediário. Nota-se que quando comparado com a Figura 5.7, houve uma menor variação de rigidez com o aumento da espessura.

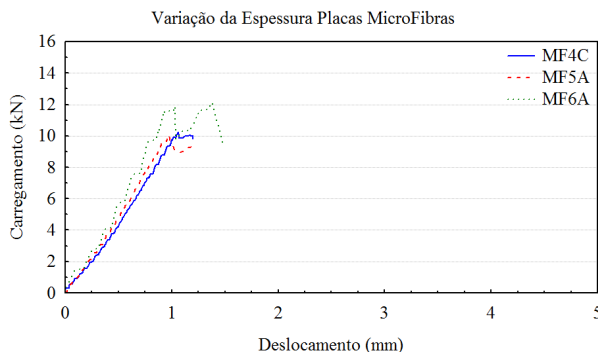


Figura 5.11 Comportamento de placas intermediarias MF.

No ensaio das placas produzidas com adição de 1% de fibra do tipo Durus, as curvas carga x deslocamento demonstram acréscimo de uniformidade no comportamento estrutural (carga de ruptura e rigidez) comparados às das placas referência e das placas com adição de 0,1% de microfibras, conforme apresentado nas Figuras 5.12 a 5.14.

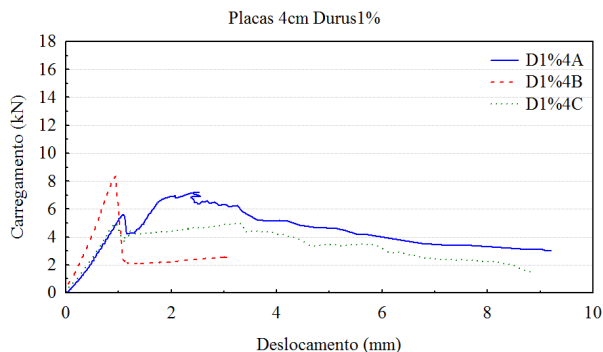


Figura 5.12 Comportamento carga x deslocamento das placas D1 %4.

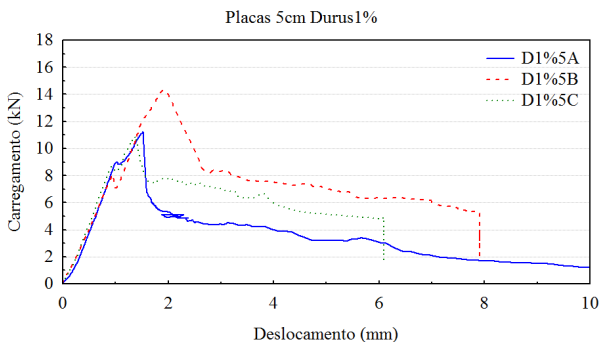


Figura 5.13 Comportamento carga x deslocamento das placas D1 %5.

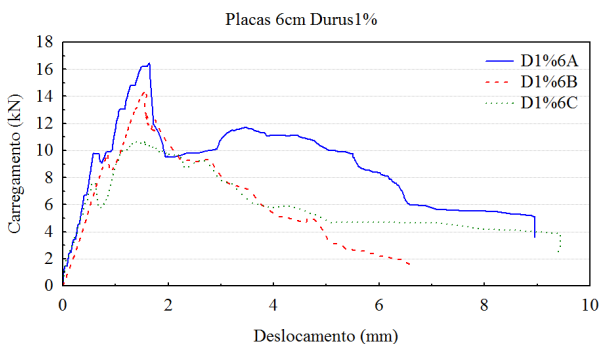


Figura 5.14 Comportamento carga x deslocamento das placas D1 %6.

O comportamento demonstrado por placas com adição de 2% de fibra Durus foi similar ao de placas com adição de 1%, como mostrado nas Figuras 5.15 a 5.17. Observa-se também um aumento considerável na ductilidade em relação às placas sem adição de fibras (referência) e com microfibras.

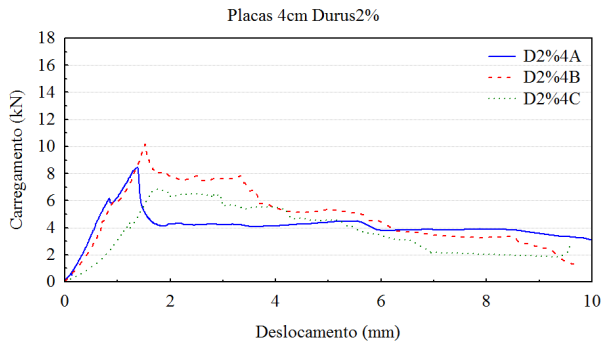


Figura 5.15 Comportamento carga x deslocamento das placas D2%5.

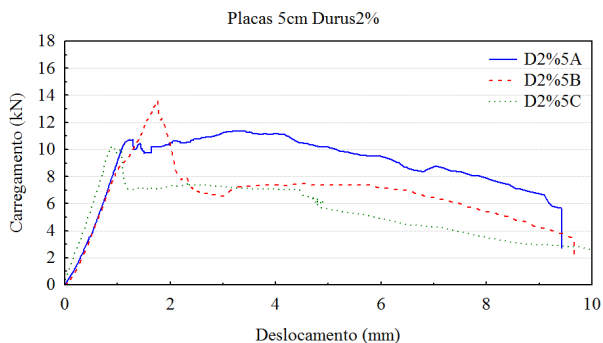


Figura 5.16 Comportamento carga x deslocamento das placas D2%5.

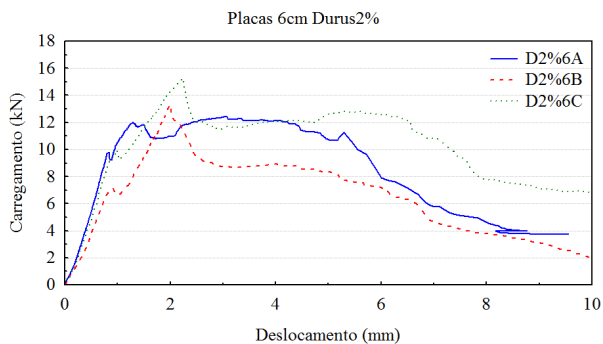


Figura 5.17 Comportamento carga x deslocamento das placas D2%5.

Os diagramas de placas com comportamento estrutural (carga e rigidez) intermediário para misturas com adição de fibra Durus em teor de 1% e 2% podem ser observados nas Figuras 5.18 e 5.19.

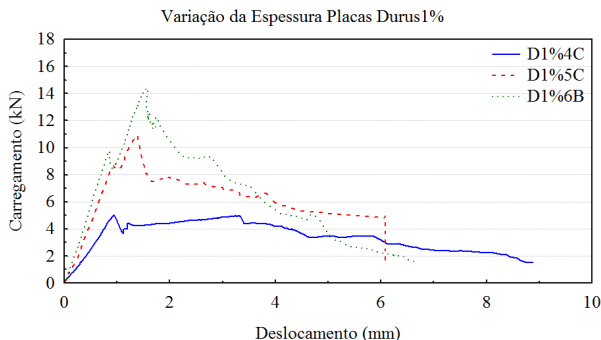


Figura 5.18 Comportamento de placas intermediárias D1%.

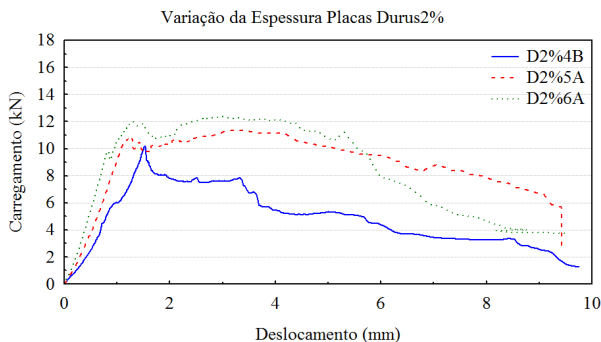


Figura 5.19 Comportamento de placas intermediárias D2%.

As Figuras 5.20 a 5.22 apresentam as curvas da relação carga x deslocamento observado para placas de comportamento intermediário agrupadas por espessuras. Observa-se que a influência da adição de fibras na inclinação inicial da curva (rigidez) diminui com o aumento da espessura. Nota-se ainda que a adição de fibras do tipo Durus aumentou sensivelmente a ductilidade pós-pico das placas e utilização de um teor de 2% de fibras apresentou maior resistência pós-pico de carregamento, comparado, à adição de 1% de fibras.

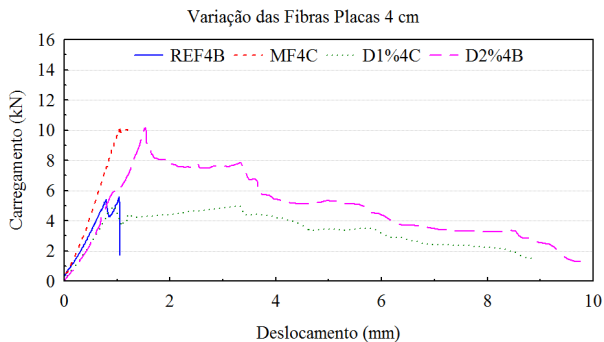


Figura 5.20 Carga x deslocamento de placas intermediárias de 6 cm.

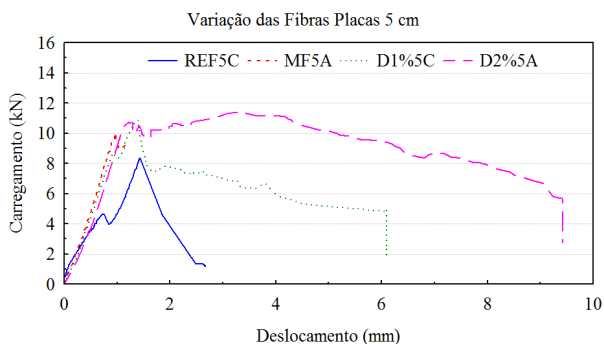


Figura 5.21 Carga x deslocamento de placas intermediárias de 6 cm.

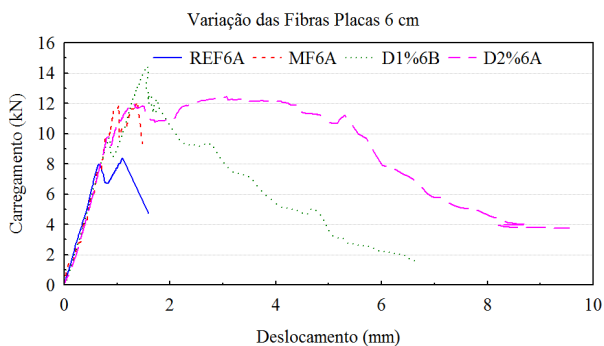


Figura 5.22 Carga x deslocamento de placas intermediárias de 6 cm.

5.1.1 Análise estatística dos resultados de carga de ruptura

Para verificar se houve influência da variação da espessura, tipo de fibra e ainda da inter-relação entre esses parâmetros sobre a carga de ruptura das placas, foi realizada uma análise de variância (ANOVA – dois fatores) com nível de significância de 5%.

Inicialmente foi realizada uma análise de variância, para verificar se os níveis de resistência das quatro misturas eram semelhantes, visto que a única diferença entre misturas se dava na adição das fibras já que o traço era o mesmo. O resultado desta ANOVA indicou que há variação entre as resistências médias (f_c) de cada mistura. Sendo assim, decidiu-se que nas análises estatísticas posteriores seria considerado a influência dos diferentes valores de f_c .

A NBR 6118 (2003): item 19.5 (Dimensionamento de lajes à punção) indica que a resistência a cargas concentradas em lajes de concreto armado está relacionada com o fator $f_c^{1/3}$. Portanto procedeu-se a análise estatística considerando a relação carga de ruptura e $f_c^{1/3}$ (*Carga de ruptura*/ $f_c^{1/3}$). A Tabela 5.2 mostra os valores analisados e a Tabela 5.3 as respostas da análise ANOVA de dois fatores.

Tabela 5.2 Valores da relação *Carga de ruptura*/ $f_c^{1/3}$ (kN/MPa^{1/3}).

Misturas	Placas de 4 cm				Placas de 5 cm				Placas de 6 cm			
	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%
A	2,9	2,1	2,2	2,6	2,9	2,8	3,5	3,5	3,9	3,4	5,1	3,9
B	1,6	2,7	2,6	3,2	3,5	2,8	4,5	4,2	2,4	4,4	4,5	4,1
C	2,5	2,9	1,5	2,1	2,4	3,7	3,4	3,2	4,0	3,2	3,3	4,7
Média	2,3	2,6	2,1	2,6	2,9	3,1	3,8	3,6	3,4	3,7	4,3	4,2
Desvio Padrão	0,7	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,9	0,6	0,9	0,4

Tabela 5.3 Resultados da análise ANOVA de dois fatores.

Fonte	SO	GDL	MO	F	n	valor
Fibra	20252,61	3	6750,87	1,74	0,19	
Espessura	136698,02	2	68349,01	17,57	0,00	
Fibra x Espessura	15522,48	6	2587,08	0,66	0,68	
Dentro	93378,57	24	3890,77			

A análise de variância mostra que o tratamento *Espessura* apresenta $p_{valor} < 0,05$, ou seja, pode-se afirmar com 95% de confiança, que a espessura da placa influenciou em sua carga ultima,

conforme já esperado. Entretanto, não foi observada diferença significativa entre as médias quando da variação das fibras ou da inter-relação *Fibra x Espessura*.

Para verificar esta influência da espessura, foi realizado um estudo de comparação múltipla de médias, sendo avaliada a variação na espessura para cada tipo de fibra utilizada. Este estudo foi feito pelo teste de *Tukey* a um nível de significância de 5%, que é baseado na amplitude total estudentizada (“*studentized range*”), e pode ser utilizado para comparar diferença entre médias de tratamentos.

A seguir são apresentadas análises de comparação múltipla de médias, onde é avaliada a variação na espessura das placas de concreto, para cada tipo e teor de fibra utilizada.

A Tabela 5.4 mostra os resultados da comparação múltipla de médias para a mistura referência (REF).

Tabela 5.4 Ordenação de médias para mistura REF.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	4 cm	247,96
A	5 cm	309,96
A	6 cm	361,76

Como $p_{valor} > 0,05$, para todas as comparações entre médias, pode-se afirmar com 95% de confiança que não há diferença significativa na relação *Carga de ruptura/resistência*^{1/3} das placas de referência com a variação da espessura.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados da comparação múltipla de médias para placas com adição de 0,1% de fibras curtas de polipropileno (Microfibra). Verifica-se comportamento similar ao das placas de referência onde não é possível afirmar que há diferença significativa na relação *Carga de ruptura/resistência*^{1/3} das placas com a variação nos valores de espessura.

Tabela 5.5 Ordenação de médias para mistura MF.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	4 cm	269,9
A	5 cm	332,43
A	6 cm	386,56

As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram resultados da comparação múltipla de médias para placas com 1% e 2% de fibra Durus (D1% e D2%).

Tabela 5.6 Ordenação de médias para mistura D1 %.

Grupo Tukey		Tratamento	Média
A		4 cm	228,93
A	B	5 cm	405,93
	B	6 cm	462,83

Tabela 5.7 Ordenação de médias para mistura D2 %.

Grupo Tukey		Tratamento	Média
A		4 cm	277,26
A	B	5 cm	382,90
	B	6 cm	446,06

Observa-se nas Tabelas 5.6 e 5.7 que o teste de tukey, mostra que a média para a relação *Carga de ruptura/resistência*^{1/3} de placas com espessura de 4 cm apresenta diferença significativa quando comparada à das placas com espessura de 6 cm. Porém, a média obtida para placas de 5 cm não difere significativamente das com 4 ou 6 cm.

Conclui-se, portanto que placas de espessura 4 cm apresentaram menor valor de carga ultima comparado a placas de 6 cm de espessura.

5.2 Resultados de carga concentrada de impacto

Os resultados obtidos dos ensaios de carga de impacto podem ser vistos na Tabela 5.8. Para cada espessura de placa e tipo de mistura é apresentados o número de golpes observados até a ruptura das placas.

Tabela 5.8 Número de golpes necessários para a ruptura das placas.

Misturas	Placas de 4 cm				Placas de 5 cm				Placas de 6 cm			
	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%
A	3	4	10	30	5	4	12	45	5	6	54	90
B	3	3	11	23	4	5	15	42	5	7	46	79
C	3	3	15	26	4	5	10	35	8	6	37	80
Média	3,0	3,3	12,0	26,3	4,3	4,7	12,3	40,7	6	6,3	45,7	83
Desvio Padrão	0,0	0,6	2,6	3,5	0,58	0,58	2,5	5,1	1,7	0,6	8,5	6,1

Considerando que cada golpe corresponde a uma energia de impacto da ordem de 20 Nm, a Tabela 5.9 apresenta a energia total absorvida até a ruptura das placas.

Tabela 5.9 Energia de impacto na ruptura das placas ensaiadas (Nm).

Misturas	Placas de 4 cm				Placas de 5 cm				Placas de 6 cm			
	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%
A	60	80	200	600	100	80	240	900	100	120	1080	1800
B	60	60	220	460	80	100	300	840	100	140	920	1580
C	60	60	300	520	80	100	200	700	160	120	740	1600
Média	60	66	240	526	86	94	246	814	120	126	914	1660
Desvio Padrão	0	12	52	70	11,6	11,6	50	102	34	12	170	122

A verificação da existência de valores espúrios para os dados da Tabela 5.9 foi realizada da mesma forma que para os valores de carga de ruptura por carregamento estático, não sendo encontrado valor espúrio.

O diagrama de dispersão da Figura 5.23 mostra a energia absorvida por cada placa ensaiada até a ruptura por impacto.

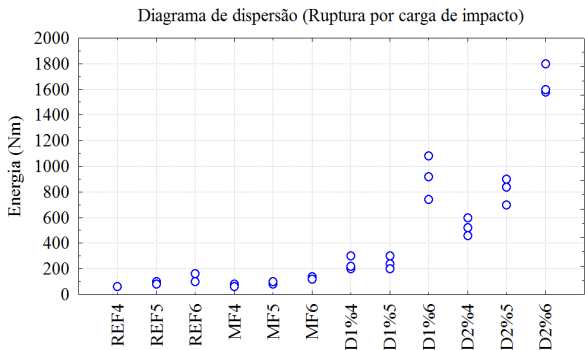


Figura 5.23 Dispersão dos resultados de ruptura por carga de impacto.

A ruptura típica das placas de concreto sem e com fibras para o ensaio de carga de impacto pode ser observada nas Figuras 5.24 e 5.25. A forma de ruptura de cada uma das placas classificadas por tipo de fibra e espessura da placa pode ser observada no Anexo C.

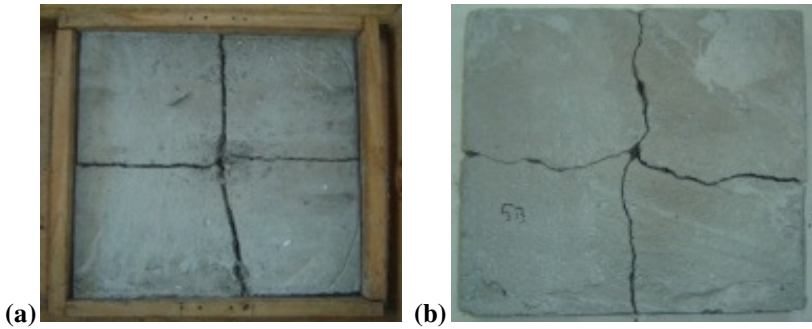


Figura 5.24 Placas REF e MF: superfície superior (a) e inferior(b).

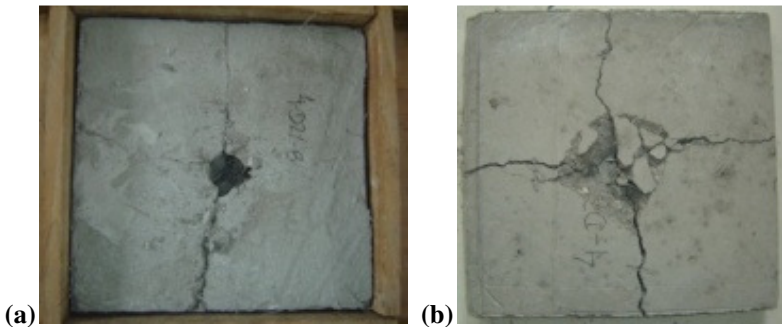


Figura 5.25 Placas D1% e D2%: superfície superior (a) e inferior (b).

Os modos de ruptura observados variaram entre ruptura à flexão e por punção. Enquanto as placas das misturas sem fibras e com adição de 0,1% de microfibras sofreram ruptura por flexão, placas de misturas com fibras do tipo Durus sofreram ruptura por punção.

A Tabela 5.10 mostra resultados da relação *Energia de impacto e resistência*^{1/3} e a Tabela 5.11 respostas da ANOVA de dois fatores.

Tabela 5.10 Energia de impacto na ruptura das placas ($Nm/fc^{1/3}$).

Misturas	Placas de 4 cm				Placas de 5 cm				Placas de 6 cm			
	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%	REF	MF	D1%	D2%
Carga	17	22,8	62	182,6	28,4	22,8	74,4	274	28,4	34	335,2	548
	17	17	68,2	140	22,8	28,4	93	255,6	28,4	39,8	285,6	481
	17	17	93	158,2	22,8	28,4	62	213	45,4	34	229,6	487
Média	17	19	74,4	160,2	24,6	26,6	76,4	247,6	34	36	283,4	505,4
Desvio Padrão	0	3,4	16,4	21,4	3,2	3,2	15,6	31,2	9,8	3,4	52,8	37

Tabela 5.11 Resultados da análise ANOVA de dois fatores.

Fonte	SO	GDL	MO	F	n valor
Fibra	1172,16	3	390,72	299,89	0,00
Espessura	369,24	2	184,62	141,70	0,00
Fibra x Espessura	332,21	6	55,37	42,50	0,00
Dentro	31,27	24	1,30		

A análise de variância mostrou que os tratamentos: Fibra, Espessura e a inter-relação entre Fibra e Espessura apresentaram $p_{valor} < 0,05$. Portanto pode-se afirmar, com 95% de confiança, que estes tratamentos influenciaram na relação *Energia de impacto*/ $fc^{1/3}$.

Para identificar a possível influência do tipo e teor de fibra utilizada na energia absorvida, procedeu-se a uma análise múltipla de médias por meio do teste de *Tukey* respectivamente para cada espessura de placa e tipo de fibra ensaiada.

As Tabelas 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam os resultados da análise múltipla de médias com variação do tipo de fibra para cada espessura.

Tabela 5.12 Ordenação de médias para espessura 4 cm.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	Referência	0,90
A	MicroFibra	1,00
B	Durus 1%	4,00
C	Durus 2%	8,60

Tabela 5.13 Ordenação de médias para espessura 5 cm.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	Referência	1,30
A	MicroFibra	1,40
B	Durus 1%	4,12
C	Durus 2%	13,28

Tabela 5.14 Ordenação de médias para espessura 6 cm.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	Referência	1,80
A	MicroFibra	1,90
B	Durus 1%	15,25
C	Durus 2%	27,11

Observa-se nas Tabelas acima que a análise das placas indicou não existir diferença significativa quanto a resistência ao impacto das

misturas sem adição de fibras (REF) e com adição de microfibras (MF). Mostrando que as mesmas apresentam resistência ao impacto inferior comparadas a misturas com fibra Durus (D1% e D2%).

A comparação entre médias no caso de misturas com fibras do tipo Durus (D1% e D2%) apresentou diferença significativa entre as médias das misturas, com a resistência a cargas de impacto da mistura D1% sendo inferior a da mistura D2%.

Conclui-se que a resistência ao impacto não foi alterada com a utilização de uma mistura contendo 0,1% de microfibras (MF) e ainda que as misturas contendo fibra DURUS (D1% e D2%) apresentaram respectivamente maior resistência ao impacto, sendo elevada de forma considerável a energia de impacto necessária para a ruptura da placas.

A seguir é apresentada uma análise de comparação múltipla de médias, sendo avaliada a influência do aumento da espessura das placas para as diferentes misturas de concreto.

As Tabelas 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam os resultados da comparação múltipla de médias para placas de cada mistura analisada.

Tabela 5.15 Ordenação de médias para mistura REF.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	4 cm	0,90
A B	5 cm	1,30
B	6 cm	1,80

Tabela 5.16 Ordenação de médias para mistura MF.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	4 cm	1,00
A	5 cm	1,40
B	6 cm	1,90

Tabela 5.17 Ordenação de médias para mistura D1%.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	4 cm	4,06
A	5 cm	4,12
B	6 cm	15,26

Tabela 5.18 Ordenação de médias para mistura D2%.

Grupo Tukey	Tratamento	Média
A	4 cm	4,06
A	5 cm	4,12
B	6 cm	15,26

Para todos os casos a comparação entre médias da relação *Energia de impacto*/ $f_c^{1/3}$ para placas de espessura 4 e 5 cm apresentou um $p_{valor} < 0,05$, indicando que existe diferença de maneira significativa entre as médias comparadas.

A análise estatística dos resultados obtidos para todas as mistura, mostra que placas com espessura de 4 cm apresentam menor resistência ao impacto quando comparado a placas com 6 cm de espessura.

5.3 Aplicação dos resultados no sistema de laje mista

Os resultados aqui obtidos identificaram que em um projeto de laje mista de concreto e perfis de PRFV com capa de concreto de 4 cm, a utilização de fibras tipo Durus aumentaria de maneira considerável a ductilidade quando da ocorrência de ruptura da laje por carregamento concentrado, tanto estático quanto de impacto.

Para o ensaio de carga estática, a análise de variância não identificou uma influência dos tipos e teores de fibras utilizados nas cargas últimas obtidas. Embora o modo de ruptura observado não tenha sido o esperado, o nível de carregamento encontrado na ruptura das placas com 4 cm de espessura foi de 8 kN, o que equivaleria a aproximadamente 2 vezes a carga de um carrinho de manutenção ou de transporte de equipamentos.

Para o ensaio de impacto, além da espessura, os tipos e teores de fibra incorporados à mistura influenciaram significativamente na energia de impacto absorvida. Para uma capa de 4 cm, a incorporação de fibras tipo Durus a 2% aumentaria em 8 vezes a energia necessária a ser absorvida para a ruptura da placa, comparada à capa de concreto sem adição de fibras. A energia encontrada equivaleria a queda de um objeto com peso aproximado 45 kg, a uma altura de 1,5 metros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Introdução

O objetivo principal deste trabalho de mestrado foi o estudo do efeito da adição de fibras de polipropileno no comportamento estrutural de capas de concreto em lajes mista de materiais compostos avançados sob a ação de carga concentrada. Para alcançar esta meta foi realizada inicialmente a análise numérica da laje mista e de modelos reduzidos representando o sistema de laje mista. A partir dos resultados numéricos foi desenvolvido um programa experimental para estudo de placas de concreto com adição de fibra sob ação de dois tipos de carregamento concentrado: carregamento monotonicamente crescente aplicado a velocidade constante de 3,5 kN/min (carregamento estático), e carga de impacto com energia da ordem de 20 Nm por impacto. As principais considerações a respeito dos experimentos realizados estão descritas respectivamente no item 6.2. Por fim no item 6.3 serão apresentadas ainda algumas recomendações e considerações para trabalhos futuros. Ressalta-se que este estudo, apesar de visar a aplicação em lajes mistas de concreto e perfis de PRFV, pode servir como base para estudos em outros tipos de laje mista ou pré-moldada, como por exemplo, a laje treliçada com preenchimento em blocos de EPS, na qual a capa de concreto tem usualmente espessuras de 4 cm a 6 cm. O principio fundamental seria substituir a armadura de distribuição ou tela utilizada por fibras de polipropileno.

6.2 Considerações sobre os experimentos realizados

6.2.1 Carregamento concentrado com carga estática

Em praticamente todos os ensaios foi observado o aparecimento de uma fissura ligeiramente inclinada na direção transversal da placa que se iniciava nos apoios e percorria a parte inferior, alcançando a face lateral e subindo em direção a parte superior até o rompimento da placa.

Nas placas sem adição de fibras ou com um teor de 0,1% de fibras curtas de polipropileno a ruptura ocorreu de forma frágil. A ruptura se dava instantes após a fissura alcançar a face lateral da placa.

Nos ensaios das placas de concreto com incorporação de fibras do tipo Durus, nos teores de 1% ou 2%, a formação de fissuras foi similar ao caso de placas sem fibras ou com microfibras. Porém após atingir a carga última, as placas mostravam comportamento dúctil deformando-se e reduzindo gradativamente sua resistência ao carregamento. Conforme aumentava a abertura da fissura foi observado o escorregamento das fibras do concreto.

A avaliação dos diagramas carga x deslocamento de placas com comportamento intermediário mostrou variação nos valores da carga última nas placas sem e com adição de fibras. No entanto, a análise estatística destes valores de ruptura quanto à variação do tipo e teor de fibras incorporado ao concreto indicou que não houve diferença significativa entre as médias de carga última. Conclui-se, portanto, que a adição de fibras na capa de concreto de uma laje mista de concreto e perfis de PRFV influenciaria somente no aumento da ductilidade.

A análise estatística dos valores de carga de ruptura com a variação da espessura das placas indicou que para misturas sem fibras ou com incorporação de microfibras não foi possível identificar variação significativa dos valores de carga de ruptura das placas. Porém para misturas com adição de fibras do tipo Durus indicou variação significativa da carga de ruptura entre as diferentes espessuras. Portanto, aumentar a espessura na capa de concreto de uma laje mista de concreto e perfis de PRFV com incorporação de fibra do tipo DURUS a 1% e 2% possibilitaria uma maior resistência a carga concentrada.

O modo de ruptura obtido por meio do procedimento de ensaio realizado não correspondeu ao esperado. O nivelamento nas faces das placas não permitiu um bom acoplamento da placa sobre os seis pontos de apoio, sendo necessária a utilização de pequenas placas adicionais de neoprene. A utilização destas pequenas placas de neoprene sobre os apoios pode ter influenciado numa distribuição de esforços diferente da observada no modelo numérico, não sendo possível a comparação dos deslocamentos com os resultados obtidos numericamente.

Embora os ensaios tenham sido realizados em placas isoladas simulando o comportamento da laje mista sob ação de carregamento concentrado, seria interessante a aplicação do ensaio diretamente na laje. Assim, obter-se-ia o modo de ruptura verdadeiro.

6.2.2 Carregamento concentrado com carga de impacto

Os modos de ruptura observados variaram entre ruptura à flexão e à punção. Enquanto as placas das misturas sem fibras e com adição de 0,1% de microfibras sofreram ruptura por flexão, sendo caracterizada pela ocorrência de fissuras perpendiculares entre si e separação da placa em 4 partes distintas. Placas produzidas com fibras do tipo Durus com teores de 1% e 2% sofreram ruptura por punção, caracterizada pela ocorrência de fissuras perpendiculares entre si e esmagamento da região logo abaixo do local de aplicação da carga de impacto.

A análise estatística da energia necessária para a ruptura das placas quanto à variação do tipo e teor de fibras incorporado ao concreto indicou que existe diferença significativa entre as médias de energia última, o que permite afirmar que placas sem e com microfibras 0,1% incorporadas a mistura não apresentaram diferença significativa quanto à energia necessária para a ruptura. Porém placas com 1% de fibras do tipo Durus adicionadas à mistura apresentaram elevação considerável da energia absorvida até a ruptura, sendo ainda maior no caso de placas com 2% de fibra Durus.

Os resultados da análise de variação da espessura das placas indicaram também diferença significativa entre as médias de carga última, permitindo afirmar que ao aumentar a espessura das placas à resistência ruptura também foi alterada.

6.3 Sugestões e recomendações para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões e recomendações para trabalhos futuros:

- Avaliar a resistência a cargas concentradas estáticas ou de impacto aplicadas diretamente na laje mista.
- Analisar a influência da incorporação de fibras do tipo Durus na fissuração por retração plástica do concreto.
- Verificar a resistência a cargas concentradas com a incorporação de teores de microfibras acima de 1% e fibra Durus abaixo de 1%.

- Avaliar a resistência a cargas concentradas no sistema de laje mista por meio de um modelo experimental que represente toda a região de contra flecha em torno do ponto de aplicação da carga.
- Estudar a resistência ao cisalhamento da laje mista submetida a cargas excêntricas, para diferentes seções de perfis de PRFV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) Committee 544. **Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete**. 1989.

ANDERSSON, J. L. **Punching of Concrete Slabs with Shear Reinforcement**. Institutionen för Byggnadsstatik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 1963.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE POLIÉSTER EXPANDIDO (ABRAPEX). Disponível em <<http://www.abrapex.com.br/>>. Acesso: março de 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndrico e prismático**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739 – Concreto: Ensaio de Compressão de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto: Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2003, 232.p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522 – Concreto: Determinação dos Módulos Elásticos de Elasticidade e de Deformação e da Curva Tensão-Deformação**. Rio de Janeiro, 2003, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro, 2007.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

BRINCK, Fabiana M.; CÂNDIDO, Luiz C.; NEVES, Francisco Assis da. **Avaliação da integridade estrutural da Ponte Marechal Hermes – Rio São Francisco/MG**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, p. 329-336, 2005.

BROMS, C.E. **A Method to Avoid the Punching Failure Mode**. Im: INTERNATIONAL WORKSHOP ON PUNCHING SHEAR CAPACITY OF RC SLABS. Sweden, 2000. p.117 – 124.

CACHIM, Paulo B. et al. **Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression**. Cement and Concrete Composites, n.24, 2002, p. 211-217.

CANALLI, Isabel Canalli. **Estudo do comportamento de estrutura mista de concreto e perfil pultrudado de PRFV sob flexão**. 2010. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CASTELO BRANCO, A. F. **Contribuição para o projeto de lajes-cogumelo**. Dissertação (Mestrado), EESC-USP, São Carlos, 1989, 217p.

Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo, Ibracon, 2005.

CORDOVIL, Fábio A. B. **Lajes de concreto armado - punção**. Editora DAUFSC, Florianopolis, 1997.

CSE–Composites. Disponível em <<http://www.csecomposites.com.br/>>. Acesso: março de 2009.

EXEL Composites. Disponível em <<http://www.exelcomposites.com>>. Acesso: Maio de 2010.

FERREIRA, Antônio Mário. **Análise da punção e flechas em lajes maciças sem vigas de concreto armado com a prescrições da NBR 6118:2003**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas

Construtivos de Edificações) – Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil. São Carlos, 2005.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editores S.A., 2003.

GIACCIO, G.; TOBES, J. M.; ZERBINO, R. **Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced Concrete**. Cement and Concrete Composites, n.30, 2008, p. 297-306.

HADI, M. N. S. **Using fibres to enhance the properties of concrete columns**. Construction and Building Materials, n.21, 2007, p. 118-125.

HALLGREN, M. **Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs**. Royal Institute of Technology, Doctoral Thesis, Stockholm. Sweden, 1996.

HANAI, João Bento de; HOLANDA, Kristiane Mattar Accetti. **Similaridades entre resistência a punção em lajes cogumelo e ao cisalhamento em vigas de concreto armado com fibras de aço**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol 1, n. 1, 2008, p. 1-16.

HARAJLI, M. H.; MAALOUF, D.; KHATIB, H. **Effect of fibers on the punching shear strength of slab-column connections**. Cement & Concrete Composites, v.17, n.2, 1995, p.161-170.

HOLANDA, Kristiane Mattar Accetti. **Análise dos mecanismos resistentes e das similaridades de efeitos da adição de fibras aço na resistência e na ductilidade a punção de lajes-cogumelo e ao cisalhamento de vigas de concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

HOLANDA, Kristiane Mattar Accetti; HANAI, João Bento de. **Análise dos mecanismos resistentes e das similaridades de efeitos da adição de fibras aço na resistência e na ductilidade a punção de lajes-cogumelo e ao cisalhamento de vigas de concreto**. Caderno de Engenharia de Estruturas, São Carlos, vol 7, n. 29, 2005, p. 79-111.

HOLLAWAY, L. C. **The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure.** Construction and Building Materials, n.17, 2003, p. 365-378.

HONG, Taehoon; HASTAK, M. **Simulation study on construction process of FRP bridge deck panels.** Automation in Construction, n.16, 2007, p. 620-631.

JUNGES, Paulo. **Análise de vibrações de uma laje mista de concreto e perfis de PRFV induzidas por atividades humanas.** 2010. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LA ROVERE, H. L. SANTOS NETO, A. B. S. **Composite concrete/FRP slab: design for crosswalk deck applications.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF COMPOSITE MATERIALS, 4., 2007, Rio de Janeiro. Anais. CD-ROM.

MANOLIS, G. D. et al. **Dynamic Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Slabs.** Cement and Concrete Composites. Vol. 19, pp. 341-349, 1997.

MELGES, J. L. P. **Análise experimental da punção em lajes de concreto armado e protendido.** Tese (Doutorado), EESC-USP, São Carlos, 2001.

MENDONÇA, P., T., R. – **Materiais Compostos & Estruturas Sanduíche – Projeto e Análise.** Editora Manole Ltda, 2005.

MOSALLAM, A., S. – **Polymer Composites: Architectural and Civil Construction Materials for the 21st Century.** In: Int. Conference on Composites in Architecture and Civil Engineering. 19-21 November. São Paulo. Brazil. 2002.

NARDIN, Silvana de et al. **Estruturas mistas aço-concreto: origem, desenvolvimento e perspectivas.** Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2003.

NeoMatex Fibras e Têxteis Técnicos para Engenharia. Disponível em: <<http://www.neomatrix.com.br/website/production/htmls/default.asp>>.

PIERIN, Igor; LA ROVERE, Henriette L. **Análise linear de estabilidade de perfis de materiais PRFV**. XXXII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 2006.

PINHO, Fernando Ottoboni; BELLEI, Ildony H.. **Pontes e viadutos em vigas mistas**. Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), 2007.

PINTO, R. C. A., HADLICH, A. R.; BIGOLIN, E. M.; KUMM, T. C. A **Avaliação da Resistência ao Impacto de Argamassas Reforçadas com Fibras de Polipropileno**. 47 CBC – IBRACON, 2005.

PINTO, R. C. A., KUMM, T. C., HADLICH, A. R. **Avaliação da Resistência ao Impacto de Mistura de Argamassa Reforçada com Fibras de Polipropileno**. Encontro Nacional Betão Estrutural 2004. Actas, Vol. 1, pp. 243-250, 2004.

POLITO, Giuliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. Trabalho de Conclusão (Especialista em Avaliação e Perícia) – UFMG, Belo Horizonte, 2006.

PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R. – **Materiais de Construção Civil I**, Notas de Aula do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R. – **Métodos Estatísticos**, Notas de Aula do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

RAMAKRISHNAN V. et al. **Cyclic behavior, fatigue strength, endurance limit and models for fatigue behavior of FRC**. IHigh performance fiber reinforced cement composites. London, 1996.

SANTOS NETO, Almir Barros da S. **Desenvolvimento de um sistema de laje mista de concreto com perfis pultrudados de materiais compostos avançados**. Tese (Doutorado) – UFSC, Florianópolis, 2006.

SAP 2000 PLUS. **Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures**. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA. Version 11, 2009.

SCHMIDT, S. E PASCHMANN, H. **Mechanical Properties of Mixed Glass Fibre Concrete**. Betonwerk + Fertigteil – Technik Concrete Plant + Precast Technology, 10, 2001.

SEIBLE, F.; KARBHARI, V., M. **Advanced Composites for Civil Engineering Applications in the U.S.**. Proceedings of the first International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI 96, Tucson, Arizona, 1996.

SOUZA, V. C. M.; Cunha, A. J. **Lajes em concreto armado e protendido**. Niterói, Rj: EDUFF, 1998.

SUKONTASUKKUL, P and MINDESS, S. **The shear fracture of concrete under impact loading using end confined beams**. Materials and Structures, v. 36, 2003, pp. 372-378.

TANG, Benjamin. **Fiber reinforced polymer composites applications in USA**. Road Workshop Proceedings, Washington, DC, 2006.

TAVARES, L. M. et al. **Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando barras de aço comum e barras de aço galvanizado**. 17º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, Paraná, 2006.

TRAUTWEIN, Leandro Mouta. **Punção em lajes cogumelo de concreto armado: análise experimental e numérica**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

ZAMBRANA VARGAS, E. N. **Punção em lajes-cogumelo de concreto de alta resistência reforçado com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado) – EESC-USP, São Carlos, 1997.

ZOLLO, Ronald F. **Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development**. Cement and Concrete Research, n.19, 1997, p. 107-122.

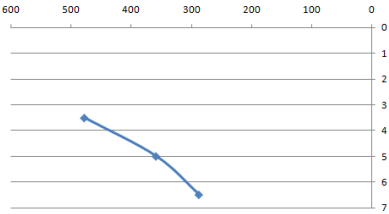
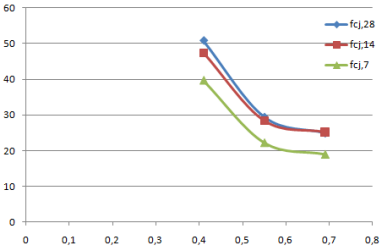
ANEXOS

Anexo A: Estudo de traço para fck de 30 MPa – curva de dosagem

ESTUDO DE TRAÇO

m	a/c	C	fcj,7	fcj,14	fcj,28
3,5	0,41	478,62	39,75	47,45	50,87
5	0,55	358,78	22,27	28,42	29,51
6,5	0,69	286,94	19	25,21	24,98

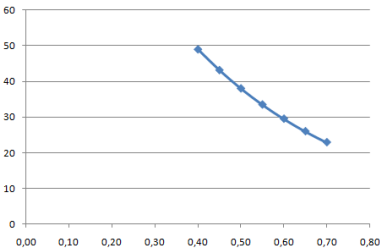
Abatimento = 10±1 cm
teor de argamassa (α) = 57%



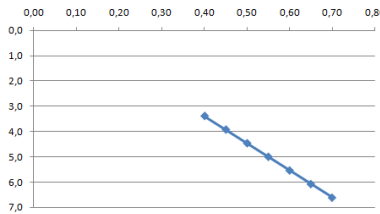
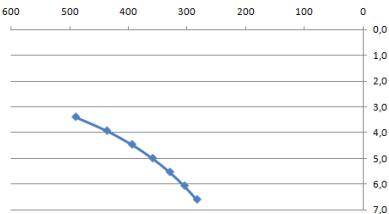
Curva de dosagem

m	a/c	C	fcj
3,39	0,40	490,32	48,99
3,93	0,45	436,92	43,15
4,46	0,50	394,02	38,00
5,00	0,55	358,78	33,47
5,54	0,60	329,33	29,48
6,07	0,65	304,35	25,96
6,61	0,70	282,89	22,87







Mpa
fck = 30
Desvio Padrão = 4
fcj = 36,6



Traço adotado:	fcj (Mpa)	a/c	m	C
	36,6 Mpa	0,51	457	386



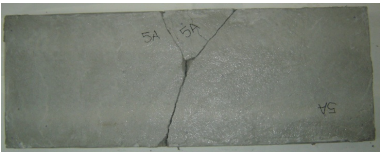
Anexo B: Ruptura das placas com carregamento estático

Modo de Ruptura das placas com a mistura Referência (REF)		
Placas de espessura 4 cm		
REF4A	Superior	
	Inferior	
REF4B	Superior	
	Inferior	
REF4C	Superior	
	Inferior	

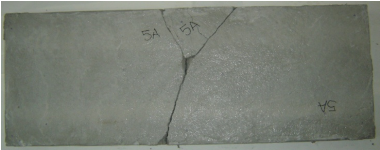
Modo de Ruptura das placas com a mistura Referência (REF)

Placas de espessura 5 cm

Superior
REF5A



Inferior



Superior
REF5B



Inferior



Superior
REF5C









Inferior



Modo de Ruptura das placas com a mistura Referência (REF)

Placas de espessura 6 cm

REF6A	Superior	
	Inferior	
REF6B	Superior	
	Inferior	
REF6C	Superior	
	Inferior	

Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (MF)

Placas de espessura 4 cm

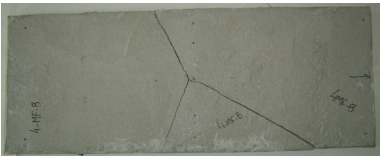
Superior
MF4A



Inferior



Superior
MF4B



Inferior









Superior
MF4C



Inferior



Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (MF)		
Placas de espessura 5 cm		
MF5A	Superior	
	Inferior	
MF5B	Superior	
	Inferior	
MF5C	Superior	
	Inferior	

Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (MF)

Placas de espessura 6 cm

Superior

MF6A



Inferior

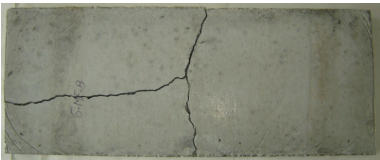


Superior

MF6B



Inferior






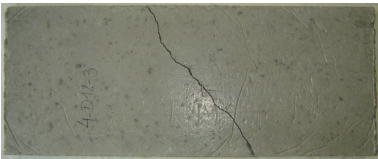


Superior

MF6C



Inferior



Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (D1%)		
Placas de espessura 4 cm		
D1%4 ^a	Superior	
	Inferior	
D1%4B	Superior	
	Inferior	
D1%4C	Superior	
	Inferior	

Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (D1 %)

Placas de espessura 5 cm

Superior

D1%5A



Inferior



Superior

D1%5B

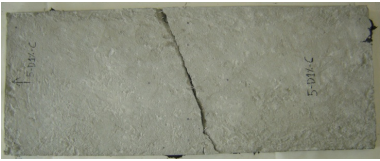


Inferior









Superior

D1%5C



Inferior



Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (D1%)		
Placas de espessura 6 cm		
D1%6A	Superior	
	Inferior	
D1%6B	Superior	
	Inferior	
D1%6C	Superior	
	Inferior	

Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (D2%)

Placas de espessura 4 cm

Superior

D2%4A



Inferior



Superior

D2%4B



Inferior




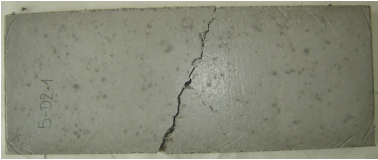




Superior

D2%4C



Inferior



Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (D2%)		
Placas de espessura 5 cm		
D2%5A	Superior	
	Inferior	
D2%5B	Superior	
	Inferior	
D2%5C	Superior	
	Inferior	

Modo de Ruptura das placas com a mistura Microfibra (D2%)

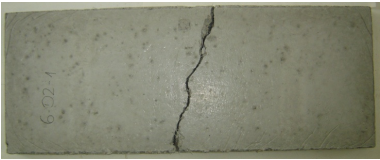
Placas de espessura 6 cm

Superior

D2%6A



Inferior



Superior

D2%6B



Inferior



Superior









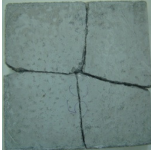

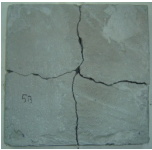




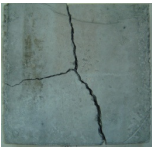
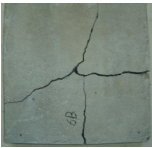
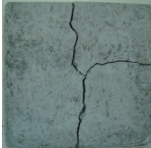
D2%6C



Inferior



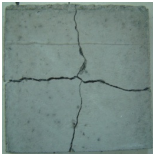
Anexo C: Ruptura das placas com carga de impacto

Modo de Ruptura por Impacto - Referência (REF)		
Placas de espessura 4 cm (vista superior e inferior)		
REF4A	REF4B	REF4C
		
		
Placas de espessura 5 cm (vista superior e inferior)		
REF5A	REF5B	REF5C
		
		
Placas de espessura 6 cm (vista superior e inferior)		
REF6A	REF6B	REF6C
		
		

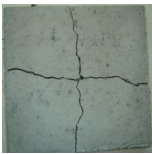
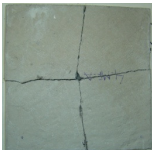
Modo de Ruptura por Impacto - Microfibra (MF)

Placas de espessura 4 cm (vista superior e inferior)

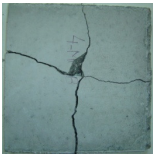
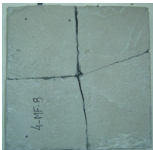
MF4A



MF4B



MF4C

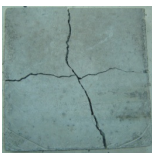


Placas de espessura 5 cm (vista superior e inferior)

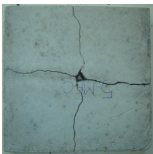
MF5A



MF5B

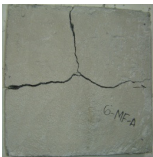


MF5C

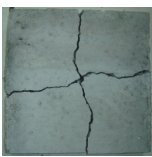


Placas de espessura 6 cm (vista superior e inferior)

MF6A



MF6B

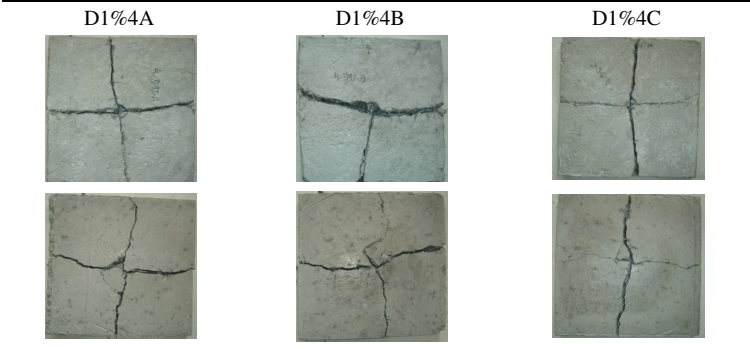


MF6C

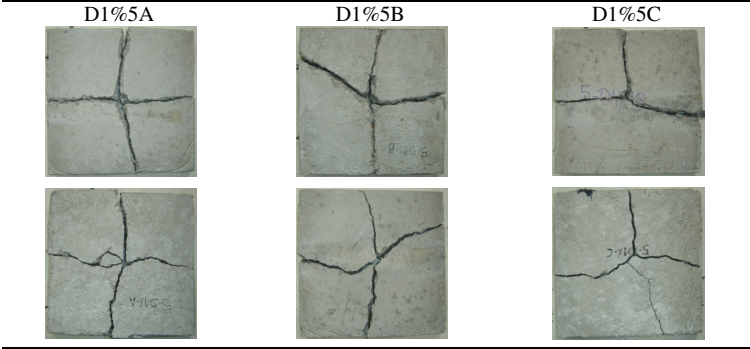


Modo de Ruptura por Impacto – Durus1% (D1%)

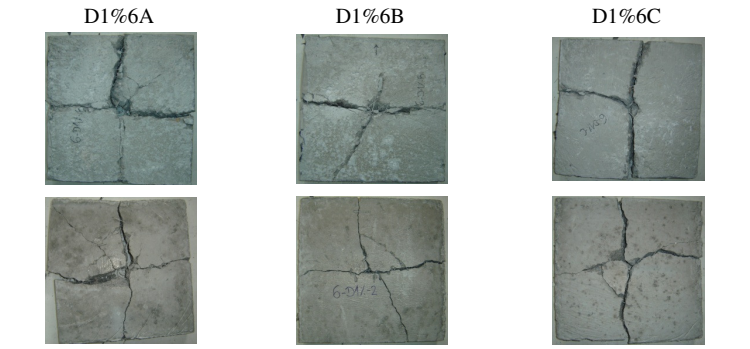
Placas de espessura 4 cm (vista superior e inferior)



Placas de espessura 5 cm (vista superior e inferior)

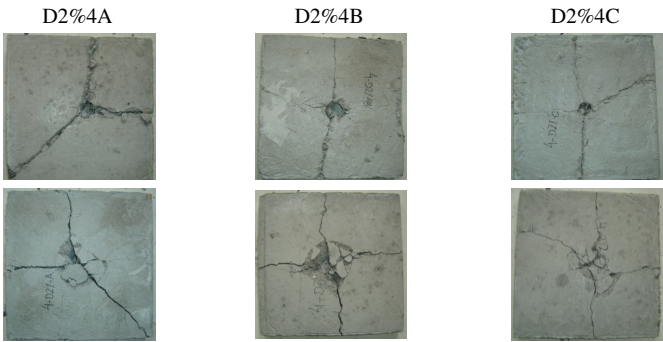


Placas de espessura 6 cm (vista superior e inferior)

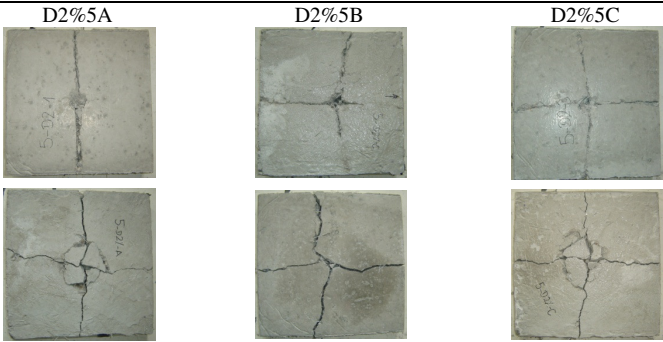


Modo de Ruptura por Impacto – Durus2% (D2%)

Placas de espessura 4 cm (vista superior e inferior)



Placas de espessura 5 cm (vista superior e inferior)



Placas de espessura 6 cm (vista superior e inferior)

